



รายงานการวิจัย

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำโดย
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง

Hydrogen Production Using in Fuel Cell from Water Splitting Reaction by
Photocatalyst

คณะผู้วิจัย

นายชัชวาลย์ สุขมั่น

ดร.ชนธิป สามารถ

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำโดยตัวเร่งปฏิกิริยา
แบบใช้แสง

Hydrogen Production Using in Fuel Cell from Water Splitting Reaction by Photocatalyst

นายชัชวาลย์ สุขมันน์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดร.ชนาธิป สามารถ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

สนับสนุนโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยเงินงบประมาณ
ประจำปี 2550 ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และ
ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง และทำยาสูด
ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา (สวพ.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่อำนวยความสะดวก
ในการตรวจทานเล่มงานวิจัย

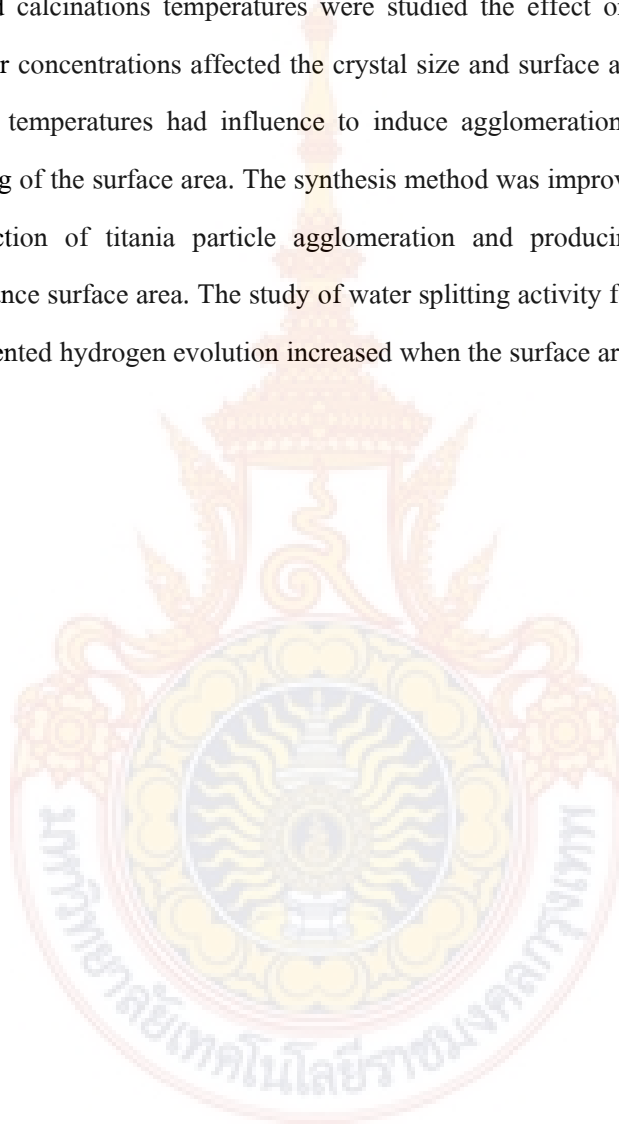
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้สำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมถูกสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจล ซึ่งศึกษาผลของสถานะในการสังเคราะห์ได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และอุณหภูมิในการแคลไซน์ที่มีผลต่อขนาดผลึก และพื้นที่ผิว พบว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อขนาดผลึก และพื้นที่ผิวเล็กน้อย ในขณะที่การศึกษาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการแคลไซน์สูง จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคไททาเนียส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลง เมื่อทำการปรับปรุงขั้นตอนการสังเคราะห์โดยทำการเติม CMC ทำให้ลดการรวมตัวกันของอนุภาคไททาเนีย และเมื่อทำการแคลไซน์จะเกิดรูพรุนในโครงสร้าง ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น และในการศึกษาประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา การแตกตัวของน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานั้นสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



ABSTRACT

This research was development of titanium dioxide photocatalyst for water splitting reaction. The titania catalyst was synthesis by sol-gel method. The synthesis conditions as precursor concentrations and calcinations temperatures were studied the effect on crystal size and surface area. The precursor concentrations affected the crystal size and surface area slightly. Where as, the higher calcination temperatures had influence to induce agglomeration of titania particle which resulted in reducing of the surface area. The synthesis method was improved by adding CMC which showed the reduction of titania particle agglomeration and producing porous structure after calcination to enhance surface area. The study of water splitting activity for hydrogen production by photocatalyst presented hydrogen evolution increased when the surface area was increased.



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
ABSTRACT	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูป	ซ
ประมวลคำศัพท์และคำย่อ	ญ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. วารสารปริทัศน์	
2.1 โลหะออกไซด์	3
2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะออกไซด์	10
2.3 คุณสมบัติ CMC	16
2.4 ไฮโดรเจน	17
2.5 น้ำ	18
2.6 กระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน	21
2.7 การแยกโมเลกุลของน้ำเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน	29
2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
3. วิธีการทำงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการทำงานวิจัย	34
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	35

หน้า

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การสังเคราะห์ไททานีด้วยวิธีโซล-เจล	37
4.2 การสังเคราะห์ไททานีโดยมีการเติม CMC	44
4.3 การทดสอบการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน	44
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 การสังเคราะห์ไททานีด้วยวิธีโซล-เจล	46
5.2 การสังเคราะห์ไททานีโดยมีการเติม CMC	46
5.3 การแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน	47
5.4 ข้อเสนอแนะ 47	
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณขนาดผลึก	51
ภาคผนวก ข. การวัดพื้นที่ผิวเฉลี่ยและขนาดรูพรุนของไททานีโดย (Branuer-Emmett-Teller, BET)	52
ภาคผนวก ค. การทดสอบโครงสร้างของไททานีโดยเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโทรสโกปี (X – Ray Diffraction Spectroscopy, XRD)	56
ภาคผนวก ง. การศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	59
ภาคผนวก จ. การหาปริมาณแก๊สไฮโดรเจน จากการแยกโมเลกุลของน้ำ โดยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC)	63
ประวัตินักวิจัย	72

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระบบของผลึก 7 ชนิด	5
2.2 ความยาวพันธะของไททานีย	10
2.3 สมบัติบางประการของไฮโดรเจน	17
4.1 ขนาดพื้นที่ผิวเฉลี่ย และขนาดผลึกอนุภาคเฉลี่ย	41
จ.1 เครื่องตรวจวัดต่างๆ ไปที่ใช้ในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	66



รายการรูป

รูป	หน้า
2.1 แกนคริสตัลโลกราฟิของผลึกรูปลูกบาศก์	4
2.2 หน่วยเซลล์ที่เกิดจาก space lattice	5
2.3 หน่วยเซลล์ต่างๆ ของระบบลูกบาศก์	6
2.4 แลตติซบราแวนส์ในแต่ละระบบของผลึก	7
2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไททานี	9
2.6 สูตรโครงสร้างของ CMC (Carboxyl methyl cellulose)	16
2.7 โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	22
2.8 การเกิดโฮลและอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ	23
2.9 การแยกโมเลกุลน้ำด้วยแสงอาทิตย์และสารกึ่งตัวนำเพื่อผลิตพลังงาน ไฮโดรเจน	30
2.10 กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาแยกโมเลกุลน้ำ	32
3.1 ชุดการทดสอบการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในการทำปฏิกิริยาร่วมกับแสง	36
4.1 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคไททานีที่สังเคราะห์ได้	37
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไททานีที่สังเคราะห์ได้เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เป็น 400°C และความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ กัน ได้แก่ (a) 0.3 M (b) 0.5 M และ (c) 0.7 M	38
4.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายไททานีในไอโซโพรพอกไซด์ในโทลูอิน ต่อขนาดอนุภาคไททานีเมื่อแคลไซน์อุณหภูมิ 400°C	39
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไททานีที่สังเคราะห์ได้ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้น 0.7 M และแคลไซน์ที่อุณหภูมิที่ต่างกัน คือ (c) 400°C (d) 500°C และ (e) 700°C	39
4.5 ผลของอุณหภูมิแคลไซน์ต่ออนุภาคไททานีเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเป็น 0.7 M	40
4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อพื้นที่ผิวไททานีเมื่อแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 400°C	42
4.7 ผลของอุณหภูมิแคลไซน์ต่อพื้นที่ผิวไททานีเมื่อความเข้มข้น 0.7 M	42
4.8 ลักษณะผลึกไททานีที่วิเคราะห์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยาย 80,000	43

รูป	หน้า
4.9 ผลของการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนที่สภาวะต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียดังนี้ (a) 0.7M /400°C, (b) 0.7M /1%CMC /400°C 1 mL และ (c) 0.7M/1%CMC /400°C 2 mL	45
ข.1 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีการดูดซับของแก๊สด้วย Branuer-Emmett-Teller (BET)	53
ข.2 แบบจำลองการดูดซับโมเลกุลหลายชั้น	54
ข.3 The BET model for adsorp	54
ค.1 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (Diffraction Spectroscopy, XRD)	56
ค.2 ส่วนประกอบของหลอดผลิตรังสีเอ็กซ์	57
ค.3 ลักษณะของมุมที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดการกระเจิงแสง	58
ง.1 องค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	60
ง.2 ส่วนประกอบของเครื่อง	62
จ.1 แผนผังแสดงลักษณะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี	64
จ.2 ชนิดคอลัมน์	64
จ.3 อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมระบบความเร็วของการไหลของแก๊สใน Agilent 6890N network	67
จ.4 อุณหภูมิภายในตู้อบคอลัมน์ของ Young Lin Instrument	67
จ.5 เทคโนโลยี Automatically Pressure-mode Selection	71

ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

XRD	=	X-Ray Diffraction
SEM	=	Scanning Electron Microscope
BET	=	Branuer-Emmett-Teller
GC	=	Gas Chromatography
nm	=	นาโนเมตร
TiO ₂	=	ไททานีย
CMC	=	Carboxyl methyl cellulose
CTAB	=	Hexadecyl trimethyl ammonium bromine
ppm	=	Part per million



บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen, H_2) ถือได้ว่าเป็นพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง สะอาด และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้รับการคาดหมายและยอมรับว่าเป็นแหล่งของพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญอย่างมากในอนาคต ปัจจุบันนี้กระบวนการเปลี่ยนรูปสารไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำ (Steam reforming of hydrocarbons) เป็นกระบวนการที่ใหญ่ที่สุดสำหรับการผลิตพลังงานไฮโดรเจน แต่ปัญหาหลักที่สำคัญมากของกระบวนการนี้คือ การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนหรือปรากฏการณ์เรือนกระจก นอกจากนี้แล้วยังประสบปัญหาการขาดแคลนแหล่งของไฮโดรคาร์บอนที่นำมาใช้ในกระบวนการอีกด้วย ดังนั้นกระบวนการอื่นซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ที่ปลอดภัย และสามารถผลิตพลังงานไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับความต้องการพลังงานไฮโดรเจนในอนาคต ดังนั้นแนวความคิดของกระบวนการแยกโมเลกุลน้ำ (Water splitting reaction) เพื่อผลิตพลังงานไฮโดรเจน จึงถูกพัฒนาขึ้นเนื่องจากความมั่นใจที่ว่า กระบวนการนี้สามารถเป็นแหล่งของพลังงานไฮโดรเจนที่ยั่งยืน (Sustainable energy) แหล่งของสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิตพลังงานในกระบวนการนี้ซึ่งได้แก่ แหล่งน้ำ ก็เป็นแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้อย่างไม่จำกัด นอกจากนี้พลังงานไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ ก็ไม่มีสารผลิตภัณฑ์อื่นที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการแตกตัวของน้ำโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสง

1.2.2 พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำ

1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์อนุภาคไททาเนีย (TiO_2) โดยใช้วิธีโซล-เจล

1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากข้อ 1.3.1 โดยการวิเคราะห์ทาง SEM, XRD และ BET

1.3.3 ออกแบบและสร้างถังปฏิกรณ์สำหรับการทำ water splitting

1.3.4 ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการทำ water splitting

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นการนำ ไททาเนียซึ่งเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงชันนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการแยกโมเลกุลของน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากพลังงานไฮโดรเจนจัดได้ว่าเป็นพลังงานเชื้อเพลิงในโลกอนาคต การผลิตพลังงานไฮโดรเจนจากแหล่งของพลังงานที่น่ากลับมาใช้ใหม่ได้และไม่หมดไป เช่น น้ำ จึงเป็นการพัฒนาด้านพลังงานไฮโดรเจนอย่างยั่งยืน

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและบทความซึ่งเกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของไททาเนีย (TiO_2) ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล-เจล (Sol-gel Method) และการแยกโมเลกุลของน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน (Water Splitting) เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัย มีหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 โลหะออกไซด์[9]

การเร่งปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญมาก โดยส่วนใหญ่เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับเคมี และการผลิตเชื้อเพลิง ในอุตสาหกรรมเคมี มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือสารที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดอัตราของปฏิกิริยาและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะ โลหะออกไซด์ เป็นต้น โลหะออกไซด์ที่ศึกษา คือ ไททาเนีย และซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)

2.1.1 โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)

2.1.1.1 แลตติซและหน่วยเซลล์ (Lattice and Unit cell)

ผลึกประกอบขึ้นจากการเรียงตัวของอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล อย่างเป็นระเบียบสม่ำเสมอใน 3 มิติ และยึดกันอยู่ด้วยแรงชนิดต่างๆ กัน ผลึกมีโครงสร้างรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน โดยทั่วไปอธิบายเกี่ยวกับผลึกใช้ในแนวความคิดที่เรียกว่า แลตติซ (Lattice) โดยใช้จินตนาการว่าผลึกสามารถสร้างขึ้นจากจุดเล็กๆ ติดต่อกันแบบซ้ำๆ ในทุกทิศทางเหมือนกัน โดยให้จุดเล็กๆนี้ เป็นจุดแลตติซ (Lattice Point) แต่ละจุดแลตติซจะต้องมีสิ่งแวดล้อมเหมือนกับจุดอื่นๆ ในทุกทิศทางที่เหมือนกัน แลตติซใน 3 มิติเรียกว่า สเปซแลตติซ (Space Lattice)

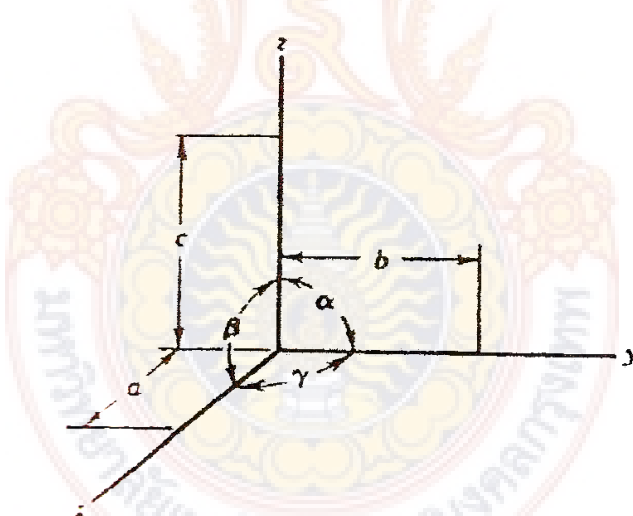
2.1.1.2 ดัชนีมิลเลอร์ (Miller Indices)

อาจพิจารณาแลตติซในลักษณะของระนาบหลายๆระนาบที่ขนานกันเป็นระยะๆ เท่าๆกัน ซึ่งระนาบดังกล่าวเรียกว่า ระนาบแลตติซ (Lattice Plane) ผิวหน้าของผลึกที่สมบูรณ์จะขนานกับระนาบแลตติซเหล่านี้ การระบุระนาบจะใช้อักษร (h k l) (ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่น) ค่า h k l เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller Indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออน หรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนี

มิลเลอร์ เช่น ระนาบ (0 1 0) จะตัดแกน x y z ที่จุด $\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$ หรือจุด $\alpha, 1, \alpha$ นั่นเอง (ระยะอนันต์ หมายถึงไม่ตัดกับแกนนั้น) ถ้าหากเป็นจุดตัดในทิศทางลบจะใส่เครื่องหมายบาร์ (Bar) ไว้บนตัวเลข นั้นๆ เช่น ระนาบ (1 1 1) จะตัดแกน x y z ที่จุด $\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$ หรือจุด $-1, 1, 1$

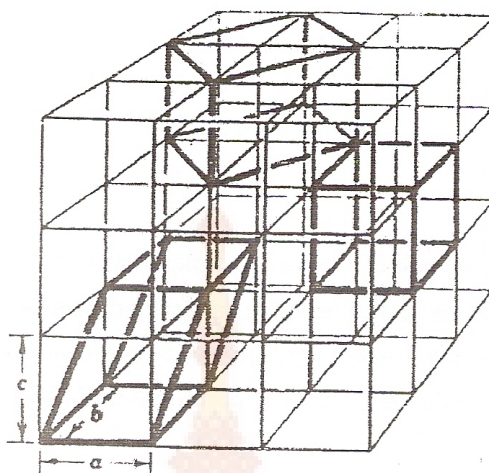
2.1.1.3 ระบบผลึก (Crystal System)

เนื่องจากผลึกมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน การบอกรูปทรงของผลึกอาจทำได้ โดยการตั้งแกนให้มีความสัมพันธ์กับรูปร่างภายนอกของผลึกนั้นๆ คือ ตั้งให้ขนานหรือทับกับพื้นที่ผิวของผลึกในสามมิติ เรียกแกนทั้ง 3 นี้ว่า แกนคริสตัลโลกราฟิค (Crystallographic Axes) ดังนั้นรูปแบบของผลึกจึงกำหนดขึ้นโดยการตัดของพื้นที่ผิวกับแกนต่างๆ และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างแกน กรณีที่ผลึกมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แกนและมุมต่างๆ ของแกนคริสตัลโลกราฟิค มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในรูปนี้จะเห็นว่าแกน x y z มีจุดตัดที่ a, b และ c ตามลำดับ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างแกน y และแกน z เรียกว่ามุม α ระหว่างแกน x และแกน y เรียกว่ามุม β ส่วนมุมที่เกิดขึ้นระหว่างแกน x และแกน y เรียกว่ามุม γ



รูปที่ 2.1 แกนคริสตัลโลกราฟิคของผลึกรูปลูกบาศก์ [9]

ผลึกประกอบขึ้นจากชุดของแลตติซเป็นไปตามที่อยู่ของอะตอม หรือไอออนในผลึกโครงร่างที่ประกอบให้เป็นผลึก อาจใช้จินตนาการได้จากการเรียงตัวของจุดแลตติซในทิศทางต่างๆ แบบเป็นตาข่ายดังในรูปที่ 2.2 รูปร่างผลึกอาจบอกได้จากหน่วยที่เล็กที่สุดเรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit Cell)



รูปที่ 2.2 หน่วยเซลล์ที่เกิดจาก space lattice [9]

ซึ่งแสดงไว้ด้วยเส้นทึบในรูป สิ่งสำคัญในการเลือกหน่วยเซลล์คือ พยายามเลือกหน่วยเซลล์ให้มีสมมาตรสูงสุด ส่วนขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์กำหนดโดยความยาวขอบ a , b , c ตามแกนคริสตัลโลกราฟิก และมุม แกนที่เลือกขึ้นจะเป็นสิ่งกำหนดรูปร่างของหน่วยเซลล์ หน่วยเซลล์ที่สร้างขึ้นซ้ำๆ กันในสามมิติจะได้รูปร่างผลึกใหญ่

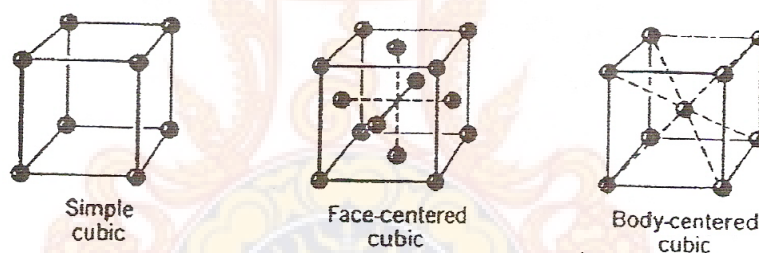
หน่วยเซลล์ที่สร้างขึ้น จะมีจุดแลตติซส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดตามมุมต่างๆ ของหน่วยเซลล์ ทำให้เกิดระบบของผลึกเป็น 7 ระบบด้วยกัน ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระบบของผลึก 7 ชนิด

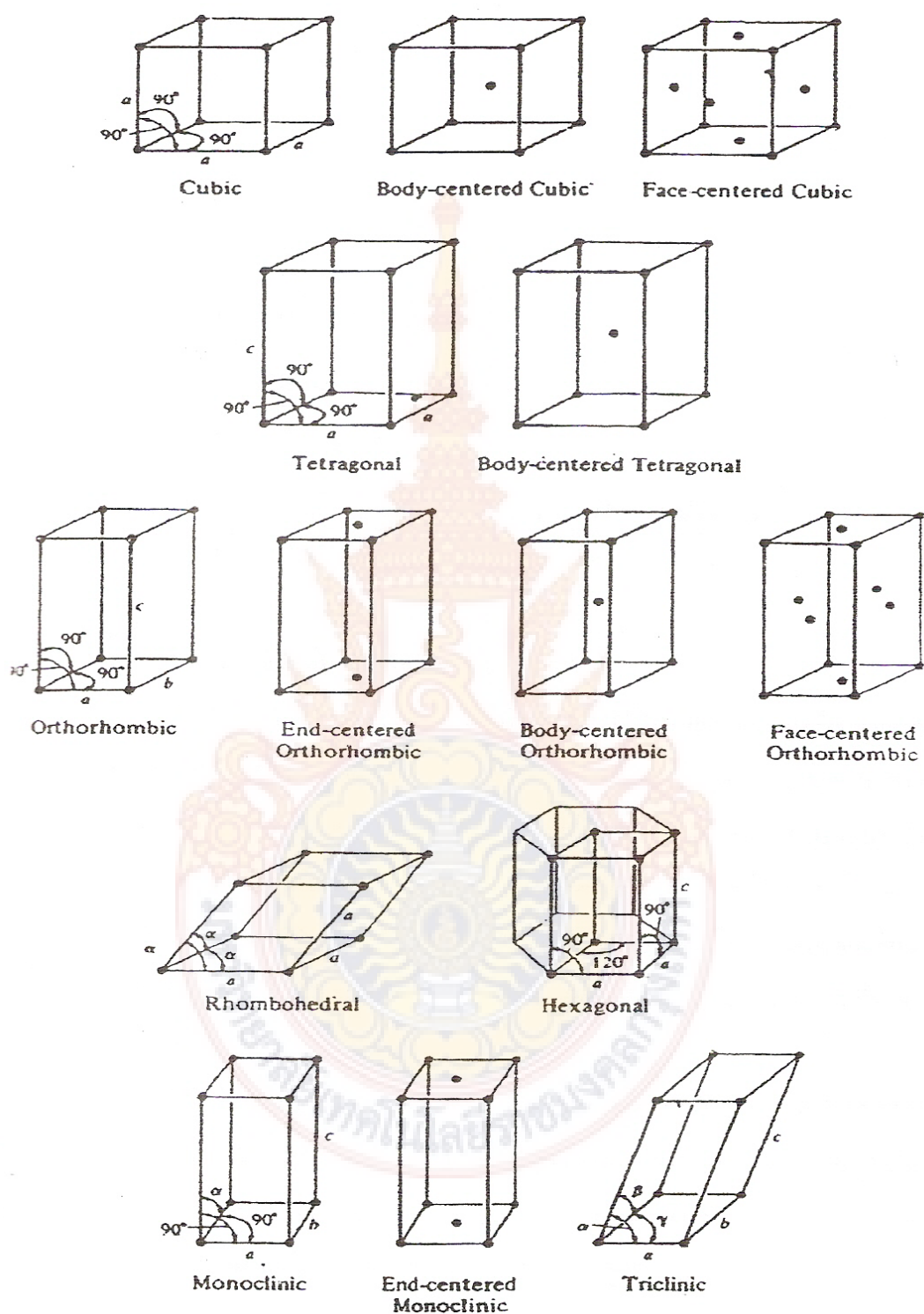
ระนาบ	มุม	ความยาวของแกน
Triclinic	$\alpha \neq \beta \neq 90^\circ$	$a \neq b \neq c$
Monoclinic	$\alpha \neq \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	$a \neq b \neq c$
Orthorhombic	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a \neq b \neq c$
Tetragonal	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b \neq c$
Rhombohedral (Trigonal)	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$a = b = c$
Hexagonal	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	$a = b \neq c$
Cubic	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b = c$

อย่างไรก็ตามจุดตามมุมต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นหน่วยเซลล์ไม่สามารถบรรยายรูปส่วนประกอบได้ละเอียดพอ เป็นต้นว่าในระบบลูกบาศก์ (Cubic System) นอกจากจะมีอะตอมหรือไอออนตามมุมทั้งแปดแล้วอาจจะมีอะตอมหรือไอออนที่จุดศูนย์กลางของพื้นผิวทั้งหก หรือตรงใจกลางของลูกบาศก์ด้วยก็ได้ เพราะฉะนั้นสำหรับระบบลูกบาศก์จึงมีแลตติซ หรือหน่วยเซลล์ถึงสามอย่างคือ

- 1) Simple หรือ Primitive cubic โดยมีจุดที่มุมของลูกบาศก์เท่านั้น
 - 2) Face centered cubic โดยมีจุดที่มุมของลูกบาศก์และตรงจุดศูนย์กลางของพื้นผิวหน้าทุกหน้า
 - 3) Body centered cubic โดยมีจุดที่มุมและที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์
- ทั้งสามอย่างปรากฏดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนประกอบอื่นๆ มีแลตติซอย่างอื่นนอกเหนือจากที่เป็น Simple หรือ Primitive และแลตติซที่กล่าวนี้เรียกว่าแลตติซบราแวลส์ (Bravais lattices) มีทั้งหมด 14 แบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 หน่วยเซลล์ต่างๆ ของระบบลูกบาศก์ [9]



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึก [9]

ในผลึกระบบต่างๆ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกัน (d_{hkl}) จะมี
ความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ของแลตติซ (Lattice parameter) ของหน่วยเซลล์ ดังนี้

Cubic	$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$
Tetragonal	$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$
Orthorhombic	$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$
Hexagonal	$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{(h^2 + hk + k^2)}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$
Monoclinic	$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right)$

2.1.1.4 ของแข็งผลึก (Crystalline solids) [9]

ไอออนมีแนวโน้มที่จะเกิดพันธะกับธาตุในกลุ่มที่อยู่ทางซ้ายหรือทางขวาของตารางธาตุ ดังนั้นเราจึงคาดว่าโลหะ (Metal) ในหมู่ 1 และ 2 จะเกิดเป็นแคโทดไอออนและโลหะ (Non-metal) ของโลหะหมู่ 6 และ 7 และไนโตรเจน จะเกิดเป็นแอนไอออนเพราะเมื่อรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดโครงสร้างเวเลนซ์อิเล็กตรอนแบบแก๊สเฉื่อย (Noble Gas) ที่เสถียรได้ แคโทดไอออนเกิดจากธาตุหมู่ 3 บางตัวได้ เช่น อะลูมิเนียม (Al^{3+}) เกิดจากโลหะทรานซิชันที่มีเลขออกซิเดชันต่ำและมีโอกาสที่จะเกิดจากธาตุในหมู่ 4 ที่มีเลขอะตอม (Atomic number) สูง เช่น Sn Pb เกิดเป็น Sn^{4+} และ Pb^{4+}

พันธะไอออนิก (Ionic Bond) เกิดขึ้นระหว่างไอออน 2 ตัวที่มีประจุตรงข้ามกัน เนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) ระหว่างไอออน พันธะไอออนิกแข็งแรง แต่ไม่มีทิศทาง (Non-directional) ผลึกไอออนิก (Ionic Crystal) ประกอบด้วยแถวของไอออนที่ไม่มีที่สิ้นสุดซึ่งจัดตัวอยู่ด้วยกันในทางที่ทำให้แรงดึงดูดคูลอมบ์ (Coulomb Attraction) ระหว่างไอออนที่มีประจุตรงข้ามกันมีมากที่สุดและแรงผลึก (Ionic Compound) ในเฮไลด์และออกไซด์ของโลหะหมู่ 1 และ 2 และมีโครงสร้างผลึกดังเช่นที่กล่าวในตอนต้น

ของแข็งไอออนิกประเภทออกไซด์ (Ionic solids-oxides type) แบ่งเป็น

- 1) โมโนออกไซด์ (MO) ได้แก่ MgO, CaO, BaO, FeO
- 2) ไดออกไซด์ (MO_2) ได้แก่ TiO_2 , CeO_2 , ZrO_2

3) ไตรออกไซด์ ได้แก่ คอรัมดัม (Corundum; M_2O_3), ReO_3

4) ออกไซด์ผสม (Mixed oxides) ได้แก่ สปินเนล (Spinel) เพอโรฟสไกต์ (Perovskite) และอิลมิไนท์ (Ilmenite)

ในที่นี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของไททาเนียและซีเรียมออกไซด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างตัวเร่งที่เตรียมได้เท่านั้น

2.1.2 โครงสร้างของไททาเนีย (TiO_2) [1]

ไททาเนีย (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไททาเนียมีความคงตัวไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยา และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

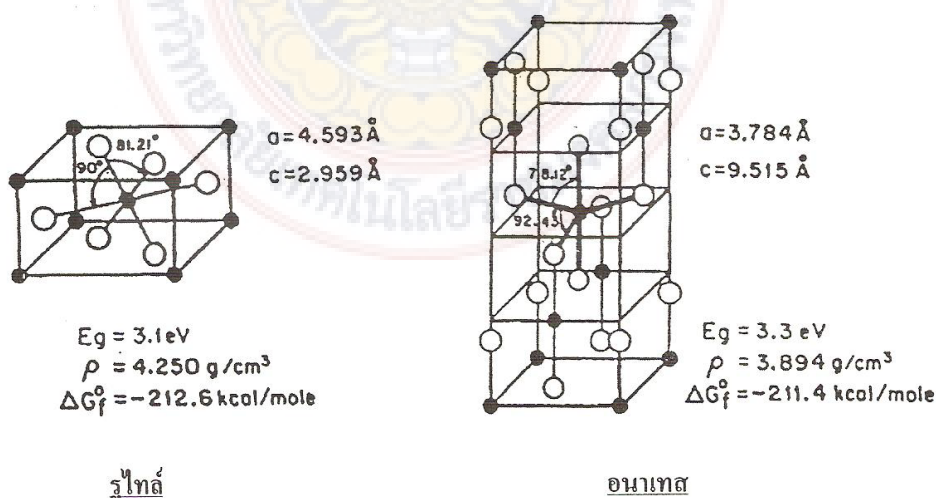
ไททาเนียที่มีอยู่ในธรรมชาติมีรูปแบบผลึกอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ คือ

1) รูไทล์ (Rutile) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ชนิดของไททาเนียที่ใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนมากจะเป็นแบบรูไทล์ เกือบทุกโรงงาน เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร และบางครั้งพบในหินอัคนี

2) อนาเทส (Anatase) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง

3) บรูกไคต์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic)

ส่วนผลึกที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ 2 ชนิดคือ อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) รูปโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไททาเนีย [9]

อนาเทสเป็นรูปผลึกที่มีความว่องไวและความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์มากกว่า รูไทล์และบรูกไคต์ เนื่องจากอนาเทสมีพื้นที่ผิวมากซึ่งการเปลี่ยนไปเป็นรูไทล์จะทำให้พื้นที่ผิวลดลง การลดลงของพื้นที่ผิวจะเกี่ยวข้องกับการสูญเสียความว่องไวในการปฏิกิริยา รูไทล์มีความหนาแน่น 4.2 g/cm^3 ส่วนอนาเทสมีความหนาแน่น 3.9 g/cm^3 ดังนั้นรูไทล์จึงจัดเรียงตัวแบบชิดกันมากกว่า อนาเทส [9]

ตารางที่ 2.2 ความยาวพันธะของไททาเนีย [15]

โครงสร้าง	Ti – O ความยาวพันธะ (Å)
อนาเทส	4-1.934
	2-1.980
รูไทล์	4-1.949
	2-1.980
บรูกไคต์	2-1.990
	1.81, 1.92, 1.94, 1.95

ที่มา: Labouriul และ Earl (1997)

2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะออกไซด์

2.2.1 เทคนิคโซล-เจล (Sol-gel technique)

วิธีนี้เป็นการเปลี่ยนสารละลายของสารตั้งต้น (Molecular Precursor) ให้อยู่ในรูปของ โซล โดยปฏิกิริยาเคมี (โซล หมายถึง อนุภาคของแข็งที่มีขนาด 1-100 nm แขนงลอยอยู่ในของเหลว) แล้วเกิดเป็นเจล (เจล หมายถึง มีของแข็งเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในตัวทำละลายแล้วเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของโซลมากขึ้นๆ เป็นโครงตาข่าย 3 มิติ) ทำให้แห้ง (Drying) แล้วทำให้เกิดความหนาแน่น (Densification) เพื่อให้เกิดเป็นของแข็ง (Solid Material) ต่อไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นองค์ประกอบเดี่ยวหรือหลายองค์ประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นสารเอกพันธ์ (Homogeneous) ที่อุณหภูมิต่ำ

เริ่มต้นจากสารละลายทำให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ (Organic-inorganic Polymerization) เพื่อให้เกิดเป็นโครงตาข่ายของแข็ง (Solid Network) มี 2 วิธีที่จะใช้ ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโมเลกุลสารตั้งต้น วิธีแรกคือ วิธีทางเคมีอนินทรีย์ จะเกิดเกลือโลหะในสารละลายที่มีน้ำ วิธีที่สองคือ วิธีทางเคมีอินทรีย์ เกิดเป็นโลหะอัลคอกไซด์ในตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะเริ่มเกิดผ่านไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้ได้ M-OH ปฏิกิริยานี้เกิดได้ง่ายโดยการเติมน้ำเข้าไปที่หมู่อัลคอกไซด์หรือการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด -เบส ของสารละลายที่มีน้ำหลังจาก

เกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation) ทำให้ได้สปีชีส์ของโลหะ -ออกซิเจน -โลหะ เมื่อเกิดการควบแน่นต่อไปในสารละลายจะนำไปสู่การเกิดเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ออกโซพอลิเมอร์และคอลลอยด์เป็นการเกิดโซล ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเจลแล้วทำให้แห้งจนสุดท้ายได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผง (Powder catalysts)

การเตรียมโดยเทคนิคโซล-เจล เป็นวิธีที่ง่ายต่อการควบคุม คือ

- คงสมบัติเป็นสารที่มีความบริสุทธิ์สูงเพราะใช้วัตถุดิบในการเริ่มต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง
- เปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของสารได้ เช่น การกระจายตัวของขนาดรูพรุน
- ทำให้องค์ประกอบต่างๆ รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้
- เตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- ทำให้มีหลายองค์ประกอบได้ภายในขั้นตอนเดียว

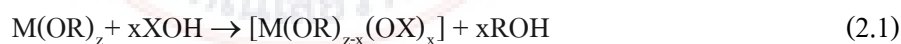
วิธีการเกิดโซล-เจล มี 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเกิดเป็นเจล (Formation of gel)
2. ระยะเวลาการเกิดเจล (Aging of gel)
3. การนำเอาตัวทำละลายออก (Removal of solvent)
4. การให้ความร้อน (Heat treatment)

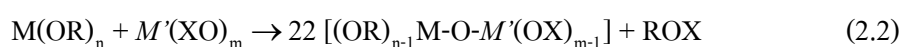
2.2.1.1 การเกิดเป็นเจล (Formation of gel)

สารตั้งต้นที่ใช้สำหรับวิธีการเตรียมโดยเทคนิคโซล -เจล สามารถใช้เกลือของโลหะหรือโลหะอัลคอกไซด์ละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม โลหะอัลคอกไซด์นิยมใช้กันมากเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับน้ำ ในกระบวนการโซล -เจลโดยทั่วไปมี 2 ปฏิกิริยาที่ใช้อธิบายกระบวนการคือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation)

ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการควบแน่น (Condensation) ของโลหะอัลคอกไซด์ (MOR) เกิดผ่านปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophilic substitution) ของอัลคอกไซด์ลิแกนด์ ด้วยสปีชีส์ไฮดรอกไซด์ (Hydroxylated species; XOH)

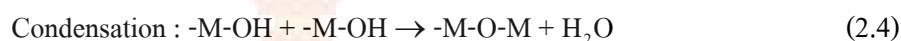


การเกิดโอลิโกเมอร์ผ่านปฏิกิริยาการเติมเข้าของนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophilic addition) ที่โมเลกุลอัลคอกไซด์ พิจารณาจากโลหะอัลคอกไซด์ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ใช้ปฏิกิริยากรด -เบส ลิวอิสอธิบายได้ว่าการสังเคราะห์นี้สารที่ระเหยออกหมด



เมื่อ X เป็น โปรตอนหรือแอซิด

ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีที่สูงของออกซิเจน ($X=3.5$) ทำให้พันธะ $M^{\delta+} - OR^{\delta-}$ มีความเป็นขั้วและอะตอมของโลหะมีความว่องไวกับนิวคลีโอไฟล์ โลหะอัลคอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลลิแกนด์ XOH เช่น β -ไดคิโตน เกิดเป็น $[M(OR)_{z-x}(OX)_x]$ ดังนั้นปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของอัลคอกไซด์ สารตั้งต้นที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะมีความว่องไวและควบคุมปฏิกิริยาควบแน่นด้วย เช่น การเติมกรดแอซิดิกในไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium isopropoxide) ซึ่งป้องกันการเกิดตะกอนและเวลาในการเกิดเป็นเจลที่รวดเร็วเกินไป หมู่แอซิเตท (AcO) ทำหน้าที่เป็นบริดจิงกไบเดนเทตลิแกนด์ (Bridging bidentate ligand) จากอัตราส่วนโมลาร์ (Molar ratio) $AcOH/Ti$ เท่ากับ 1 ทำให้เกิดสปีชีส์โอลิโกเมอร์ของ $[Ti(O-i-Pr)_3(OAc)_n]$ ($n=2, 3$)



แบ่งเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. $h > 1$; แสดงว่า มีจำนวนโมลของน้ำน้อยกว่าจำนวนโมลของ $M(OR)_m$ ทำให้เกิดเป็นหมู่ $-M-OH$ น้อย ดังนั้นจึงมีสารตั้งต้นของการควบแน่นต่ำ การเชื่อมโยง (Cross-linking) จึงไม่สามารถเกิดได้ในสภาวะที่ไม่มีน้ำมากเกินไป

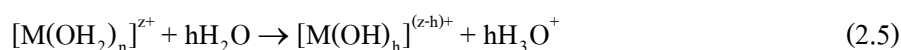
2. $1 < h < m$; แสดงว่า มีจำนวนโมลของน้ำมากกว่าจำนวนโมลของ $M(OR)_m$ แต่มีจำนวนของน้ำน้อยกว่าจำนวนของหมู่อัลคอกไซด์ การเกิดเจลก็สามารถเกิดได้แต่หมู่อัลคอกไซด์ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น $-M-O-M-$ ได้ทั้งหมด

3. $h > m$; แสดงว่า มีจำนวนโมลของน้ำมากกว่าหมู่อัลคอกไซด์ ทำให้สามารถเกิดเจล หรือการเกิดตะกอนได้ เมื่อมีน้ำมากเกินไปในการเติมเข้าที่หมู่อัลคอกไซด์

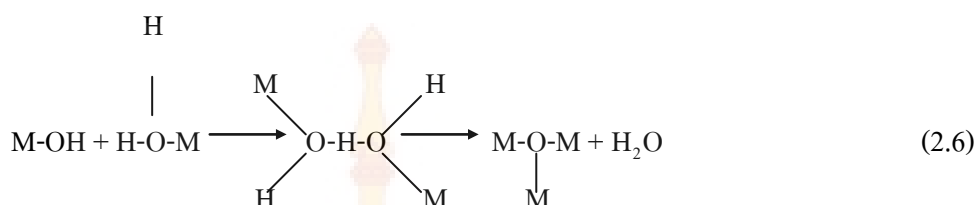
ดังนั้นในการเกิดกระบวนการ โซล-เจล ควรจะมีปริมาณของน้ำมากเกินไป แต่เมื่อพิจารณาในขั้นต่อไป คือ การนำเอาของเหลวออกจากเจลแล้วจึงควรมีการกำจัดปริมาณน้ำด้วย

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแคตไอออนของโลหะและปฏิกิริยาควบแน่น (Hydrolysis of metal cations and condensation)

โดยทั่วไปในสารละลายน้ำจะเกิดโซลเวชัน (Solvation) โมเลกุลน้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วเข้าล้อมรอบแคตไอออนซึ่งมีประจุบวก ทำให้เกิดสปีชีส์ $[M(OH_2)_n]^{z+}$ น้ำทำหน้าที่เป็นเบสลิวิส ทำให้เกิดพันธะ $M-OH_2$ เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ทำให้พันธะ $O-H$ ของโมเลกุลน้ำที่โคออร์ดิเนตมีความเป็นกรดที่แรงกว่าโมเลกุลน้ำที่โมเลกุลอิสระ ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียโปรตอน (Deprotonation) ได้เอง

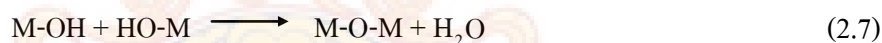


ปฏิกิริยาการควบแน่น (Codensation) ของแคตไอออนโลหะไฮเดรต (Hydrated metal cations) เกิดผ่านปฏิกิริยาโอเลชันหรือออกโซเลชัน พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดผ่านการกำจัดโมเลกุลน้ำจาก Mononuclear hydroxo-aqua cation, $[M(OH)(OH_2)_{n-1}]^{(z-1)+}$



ลิแกนด์ไฮดรอกซิลของอะตอมโลหะจะสร้างพันธะที่สั้นและสมมาตรกับพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำที่โคออร์ดิเนตกับอีกอะตอมโลหะหนึ่ง ดังนั้นจึงเกิดเป็นไฮโดรเจนออกไซด์บริดจิงลิแกนด์ (Hydrogen-oxide bridging ligand) ระหว่างอะตอมของโลหะทั้งสอง

ปฏิกิริยาออกโซเลชันเกี่ยวข้องกับการควบแน่นของ OH^- หมู่เกิดเป็นโมเลกุลน้ำ 1 โมเลกุล ดังนั้นจึงเกิดออกโซบริดจ์ระหว่างโลหะอะตอมทั้งสอง กล่าวได้ว่าเป็นการกำจัดน้ำ (Dehydration) ของสปีชีส์โอเลต (Olated species) ดังนั้นออกโซเลชันเป็นโซเวชันโอเลชัน (Solvation olation)



ปฏิกิริยาโอเลชันและออกโซเลชัน จำเป็นต้องมีประจุหนึ่งหมู่ของหมู่ $-\text{OH}$ ที่โคออร์ดิเนตกับโลหะ อย่างไรก็ตามจะไม่เกิดการควบแน่นเมื่อโลหะมีประจุเป็นบวกต่ำ ($\delta_m > 0.3$)

2.2.1.2 ระยะเวลาในการเกิดเจล (Aging of gel)

ช่วงเวลาระหว่างการเกิดและการนำเอาตัวทำละลายออกเรียกว่าแอจิง (Aging) แต่ยังคงมีของเหลวในรูพรุน (Pore Liquid) อยู่ในเมทริกซ์

เจล (Gel) มีลักษณะยืดหยุ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ในเจลที่เป็นอนุพันธ์อัลคอกไซด์ (Alkoxide-derived gel) เกิดการควบแน่นระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว (Surface Functional Group) เกิดต่อเนื่องไปหลังจากจุดที่เปลี่ยนเป็นเจล เมื่อเกิดการควบแน่นมากขึ้น ๆ จนทำให้เจลหดตัวขับเอาตัวทำละลายออกหมดเรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า ซิเนอไรซิส (Syneresis)

การทำให้หยาบ (Coarsening) เป็นกระบวนการเชิงฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องความสามารถในการรวมกันของพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ขนาดของโพรงต่างกันด้วย ถ้ารูพรุนมีขนาดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีพื้นที่ผิวเฉพาะ (Specific Surface Area) ลดลง

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล คือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส ของของเหลวในรูพรุน

2.2.1.3 การทำให้แห้ง (Drying)

การทำให้แห้ง (Drying) คือ การเอาของเหลวในรูพรุน (Pore Liquid) ออกจากโครงตาข่ายเจล (Gel Network) ดังนั้น ความดันคาпилลารี (Capillary Pressure) มีส่วนช่วยทำให้เกิดวัฏภาคของเหลว-ไอ (Liquid-Vapor Interface) ภายในรูพรุนด้วย ซึ่งความดันคาпилลารีจะมีมากสำหรับรูพรุนขนาดเล็ก กล่าวคือ ถ้ารูพรุนมีขนาดเล็กมากในการทำให้แห้ง เมื่อเอาของเหลวในรูพรุนออก ทำให้เกิดแรงดันภายในรูพรุนมาก เช่น รูพรุนรัศมี 1 nm จะมีความดันคาпилลารี 1.5×10^8 Pa มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนในช่วงกว้าง มีผลทำให้ความดันต่างกันนำไปสู่การยุบตัวของโครงสร้างรูพรุน

วิธีการที่จะทำให้คงเป็นโครงตาข่ายเจล โดยการทำให้ความดันคาпилลารีมีค่าน้อยที่สุด และมีความแตกต่างของความดันน้อยที่สุดด้วย

2.2.1.4 การแคลไซน์/การหลอมรวมกัน (Calcination/Sintering)

หลังจากที่เอาของเหลวในรูพรุนออก เมื่อให้ความร้อนมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเปลี่ยนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้งานได้โดยการให้ความร้อนจะผ่านแก๊สที่องไว (Reactive gas) ไปด้วย เช่น อากาศ ออกซิเจนหรือไฮโดรเจนเพื่อกำจัดการอินทรีย์ (Residual Organic) ออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์สารตัวเร่งนั้น เพื่อนำไปใช้ตามจุดประสงค์ที่ต้องการ โดยทำที่อุณหภูมิสูงกว่าที่จะเกิดการหลอมรวมกันได้ เพราะต้องการตัวเร่งที่เสถียรที่ใช้ในปฏิกิริยานั้นๆ ได้ กระบวนการแคลไซน์ทำให้สารเกิดเป็นผลึกในโครงสร้างที่ค่าแตกต่างกันเมื่อทำที่อุณหภูมิต่างกัน ดังนั้นพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) เวลาและสิ่งแวดล้อมของแก๊ส (Gaseous Environment)

2.2.2 วิธีอื่นๆ

2.2.2.1 วิธีการฝังตัว (Impregnation Method)

เป็นวิธีที่ง่ายและใช้กันมากที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำได้โดยการเติมตัวรองรับ (Support) เช่น อะลูมินาลงในสารละลายของเกลือโลหะ เช่น เกลือไนเตรต เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนตัวรองรับสลายตัวให้โลหะออกไซด์เกาะบนตัวรองรับ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการฝังตัวสามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ

1. การฝังตัวแบบเปียก (Wet Impregnation)

วิธีนี้เป็นการเติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะ ที่มีปริมาณมากเกินไป ดังนั้นปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ จะรู้ก็ต่อเมื่อรู้ปริมาณของเกลือโลหะก่อนและหลังเตรียม ผลต่างของปริมาณเกลือโลหะก่อนและหลังการเตรียมจะเป็นปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ ซึ่งไม่สะดวกนักถ้าทำในห้องปฏิบัติการ

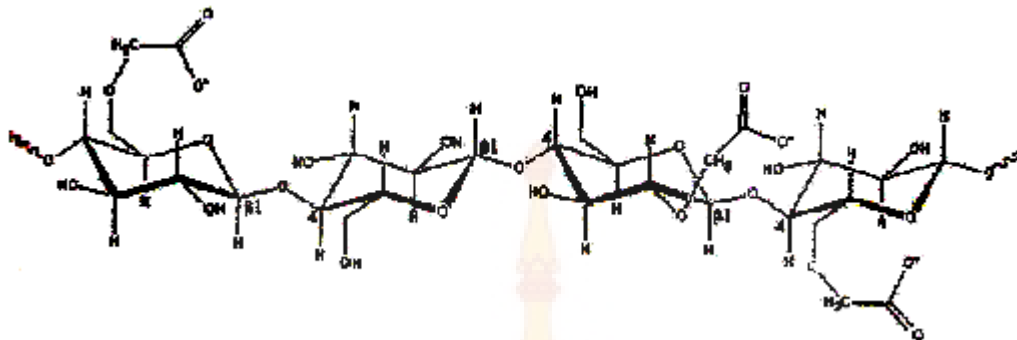
2. การฝังตัวแบบแห้ง (Dry impregnation or Impregnation to incipient wetness)

เป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไปในทางอุตสาหกรรม ตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัวและพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณเท่ากับปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่องไวที่เกาะบนตัวรองรับได้อย่างถูกต้อง แต่ปริมาณสูงสุดของการเกาะแต่ละครั้งถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลายของสาร หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะถูกทำให้แห้งและนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง

2.2.2.2 วิธีการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation Method)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ (Support) โดยวิธีตกตะกอนหรือตกตะกอนร่วม เป็นเทคนิคที่สำคัญมาก อย่างไรก็ตามการตกตะกอนเป็นวิธีการเตรียมที่ใช้มากกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์สามารถแยกออกมาได้หลังจากการตกตะกอน และปริมาตรจำนวนมากของสารละลายที่มีเกลือเป็นส่วนประกอบสามารถเกิดได้หลังจากการตกตะกอน การตกตะกอนเป็นวิธีการประยุกต์ที่ใช้มากที่สุดในการเตรียมตัวเร่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารพวย ประโยชน์หลักของการตกตะกอนสำหรับการเตรียมของวัสดุคือนั้นเป็นไปได้ว่าจะทำให้เกิดวัสดุที่บริสุทธิ์ และสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดในกระบวนการเกิด เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นโดยพื้นฐานจะเป็นตัวประกอบมากกว่า 1 ชนิด โดยสามารถเตรียมได้จากการตกตะกอนร่วมตามความหมายของ IUPAC การตกตะกอนร่วม หมายถึง การตกตะกอนพร้อมๆ กันขององค์ประกอบที่สามารถละลายได้อย่างปกติ เป็นอนุภาคนาโนใหญ่จากสารละลาย โดยเกิดเป็นผลึก อาจจะด้วยการดูดซับ (Adsorption) หรือการดักจับด้วยกลไก (Mechanical Entrapment) กล่าวโดยสรุป การตกตะกอนร่วม คือ การตกตะกอนพร้อมๆ กันขององค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด การตกตะกอนร่วมเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันขององค์ประกอบที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือการสร้างสารเริ่มต้นที่ต้องการสร้างปริมาณสารสัมพันธ์ที่แน่นอน ซึ่งง่ายต่อการเปลี่ยนไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไว (Active Catalyst) มีการกระจายตัวขององค์ประกอบที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ซึ่งถ้าใช้วิธีอื่นจะทำได้ยาก

2.3 CMC (Carboxyl methyl cellulose) [21]



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของ CMC (Carboxyl Methyl Cellulose) [21]

ความหนืด

ความหนืดเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมสารละลาย CMC ซึ่งสามารถเตรียมได้ที่ความหนืดต่างๆ เช่น สารละลายที่สามารถปรับเปลี่ยนความหนืดและเปลี่ยนค่าแรงเค้นได้ ดังนั้น จึงสามารถเตรียมสารละลาย CMC จะประกอบไปด้วยชนิดและจำนวนของตัวบวกรวมที่ละลายใน CMC และในการเตรียมจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิสถานะที่มีแรงเค้นที่เหมาะสม

ความเข้มข้น

ความหนืดของสารละลาย CMC ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

แรงเค้น

สารละลาย CMC ที่ใช้จะมีลักษณะ ข้น แฉวนลอยในน้ำ เป็นเจล มีความเสถียรหรือมีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ หรือให้เกิดการแฉวนลอยในน้ำ ซึ่งจะต้องเตรียมให้สารมีแรงเค้นที่เหมาะสม

อุณหภูมิ

ความหนืดของสารละลาย CMC ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิจึงทำให้มีความสำคัญต่อระดับความหนืดของสารละลาย CMC อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ให้ความร้อนและระดับความร้อนที่ให้ถ้าสูงเกินไปก็จะไม่ดีต่อการเตรียมสารละลาย CMC และทำให้ความหนืดลดลงไปด้วย

ค่า pH

สารละลาย CMC โดยทั่วไปแล้วจะมีความหนืดที่เหมาะสมในช่วง pH ที่เหมาะสม สารละลาย CMC ที่มีความหนืดมากๆ และมีความเสถียรที่ดีจะอยู่ในช่วง pH 7-9 ที่ pH สูงกว่า 10 ความหนืดของสารละลาย CMC จะลดลงเล็กน้อย ถ้า pH ต่ำกว่า 4 จะละลายในกรดได้น้อยมากและจะมีความหนืดที่สูงมาก

2.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen) [13]

ไฮโดรเจน (อังกฤษ: Hydrogen ; ละติน: hydrogenium: ไฮโดรเจนเนียม) เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุมีสัญลักษณ์ **H** และมีเลขอะตอมเท่ากับ 1 ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศมาตรฐาน ไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่โมเลกุลมี 2 อะตอม ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟง่าย เป็นอโลหะ และมี อิเล็กตรอนชั้นนอกสุด (เวเลนซ์อิเล็กตรอน) ตัวเดียว ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด และมีปรากฏในจักรวาลมากที่สุดมีอยู่ในโมเลกุลของน้ำ ในสารประกอบอินทรีย์ ทุกตัว และสิ่งมีชีวิตทุกชนิด . ไฮโดรเจนสามารถมีปฏิกิริยาได้กับธาตุอื่น ๆ ส่วนใหญ่ ดาวฤกษ์ในช่วงหลักประกอบด้วยไฮโดรเจนในสถานะ พลาสมาเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ ธาตุนี้ยังใช้ในการผลิต แอมโมเนีย ใช้เป็นแก๊สสำหรับ ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน และเป็นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง ในห้องทดลองไฮโดรเจนได้มาจากการปฏิกิริยาของ กรดบน โลหะ เช่น สังกะสี ในการผลิตจำนวนมาก ไฮโดรเจนที่ใช้ในการค้าได้มาจากการย่อย แก๊สธรรมชาติ การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่ง่ายแต่สิ้นเปลือง ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังวิจัยเกี่ยวกับวิธีใหม่ ๆ ในการผลิตไฮโดรเจน เช่น การใช้ สาหร่ายสีเขียว ส่วนอีกวิธีที่มีความหวังคือ การใช้ผลิตภัณฑ์จากชีวมวล เช่น กลูโคสหรือซอร์บิทอล ซึ่งสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใหม่

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของไฮโดรเจน

สมบัติของไฮโดรเจน	สมบัติที่ปรากฏ
สมบัติทั่วไป	
สัญลักษณ์ หมายเลข	H, 1
อนุกรมเคมี	อโลหะ
หมู่ คาบ บล็อก	1, 1, S
มวลอะตอม	1.00797 g/mol
ลักษณะที่อุณหภูมิปกติ	ไม่มีสี
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	1s ¹
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	1

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

สมบัติของไฮโดรเจน	สมบัติที่ปรากฏ
สมบัติทางกายภาพ	
เฟส	แก๊ส
ความหนาแน่น	(0 °C, 101.325 kPa) 0.08988 g/L
จุดหลอมเหลว	14.01 K (-259.14 °C)
จุดเดือด	20.28 K (-252.87 °C)
Triple point	13.8033 K , 7.042 kPa
ความร้อนของการหลอมเหลว	(H ₂) 0.117 kJ/mol
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	(H ₂) 0.904 kJ/mol
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) (H ₂) 28.836 J/mol·K

2.5 น้ำ (Water) [12]

น้ำ เป็นของเหลวชนิดหนึ่งซึ่งถ้าบริสุทธิ์จะไม่มีรส ไม่มีกลิ่น และไม่มีสี น้ำเป็นของเหลวที่มีอยู่มากที่สุดบนผิวโลก และเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของ สิ่งมีชีวิต ทุกชนิดที่มนุษย์รู้จัก เราสามารถพบน้ำได้ในหลายๆ สถานที่ อาทิ ทะเล ทะเลสาบ แม่น้ำ ห้วย หนอง คลอง บึง และในหลายๆ รูปแบบ เช่น น้ำแข็ง หิมะ ฝน ลูกเห็บ เมฆ และไอน้ำ

น้ำมีรูปแบบและสถานะเป็นของเหลว แต่น้ำก็ยังมีในรูปแบบของสถานะ ของแข็งที่เรียกว่าน้ำแข็ง และสถานะ แก๊สที่เรียกว่าไอน้ำ น้ำปริมาณประมาณ 1.460 เพตะตัน ปกคลุม 71% บนพื้นผิวโลก ส่วนมากในมหาสมุทรและในแหล่งน้ำแห่งใหญ่ทั่วไป น้ำ 1.6% อยู่ภายใต้หินหรือพื้นดินที่ยังมีน้ำแข็งอยู่และอีก 0.001% อยู่ในอากาศในรูปแบบของไอน้ำและ ก้อนเมฆ ซึ่งเป็นลักษณะของส่วนของของแข็งและของเหลวลอยอยู่บนอากาศและเกิดการตก ตะกอน น้ำบนโลกบางส่วนถูกบรรจุลงในสิ่งของต่าง ๆ ที่เกิดโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นบนโลก อย่างเช่น อ่างเก็บน้ำ ในร่างกายของสัตว์และพืช ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และร้านอาหาร

น้ำในมหาสมุทร มีอยู่มากถึง 97% ของพื้นผิวน้ำทั้งหมดบนโลก ธารน้ำแข็ง และน้ำแข็งขั้วโลกอีก 2.4% และที่เหลือคือน้ำที่อยู่บนพื้นดินเช่น แม่น้ำ ทะเลสาบ บ่อน้ำ อีก 0.6% น้ำเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องผ่านวัฏจักรของการกลายเป็นไอหรือการคายน้ำ การตกลงมาเป็น ฝน และการไหลของน้ำซึ่งโดยปกติจะไหลไปสู่ ทะเล ลมเป็นตัวพาไอน้ำผ่านเหนือพื้นดินในอัตราที่เท่า ๆ กันเช่นเดียวกับการ

ไหลออกสู่ทะเล น้ำบางส่วนถูกกักขังไว้เป็นเวลาหลายยุคหลายสมัยในรูปแบบของน้ำแข็งขั้วโลก ธารน้ำแข็ง น้ำที่อยู่ตามหินหรือดิน หรือในทะเลสาบ บางครั้งอาจมีการหาน้ำสะอาดมาเลี้ยงสิ่งมีชีวิตบนพื้นดิน น้ำใสและสะอาดนั้นเป็นสิ่งจำเป็นต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ

น้ำมีสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีมาก เราจึงไม่ค่อยพบน้ำบริสุทธิ์ในธรรมชาติ ดังนั้นน้ำสะอาดที่เหมาะสมต่อการบริโภคของมนุษย์จึงเป็นทรัพยากรที่มีค่ายิ่ง ในบางประเทศปัญหาการขาดแคลนน้ำเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อสังคม และเศรษฐกิจของประเทศนั้นอย่างกว้างขวาง

2.5.1 รูปแบบของน้ำ

น้ำมีหลายรูปแบบ เช่น ไอน้ำและเมฆบนท้องฟ้า คลื่นและก้อนน้ำแข็งในทะเล ธารน้ำแข็งบนภูเขา น้ำบาดาลใต้ดิน ฯลฯ น้ำเปลี่ยนแปลงรูปแบบ สถานะ และสถานที่ของมันตลอดเวลา โดยผ่านกระบวนการกลายเป็นไอ ตกกลับสู่พื้นดิน ซึม ชะล้างและไหล ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำบนผิวโลกเรียกว่าวัฏจักรของน้ำ เนื่องจากการตกลงมาของน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกษตรและต่อมนุษย์โดยทั่วไป มนุษย์จึงเรียกการตกลงมาของน้ำแบบต่างๆ ด้วยชื่อเฉพาะตัว ฝน ลูกเห็บ หมอก และน้ำค้างเป็นการตกลงมาของน้ำที่พบได้ทั่วโลก แต่ หิมะและน้ำค้างแข็ง มีเฉพาะในประเทศเขตหนาว รุ้งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อละอองน้ำในอากาศต้องแสงอาทิตย์ในมุมที่เหมาะสม

น้ำมีความสำคัญต่อมนุษย์ไม่แพ้การตกลงมาของน้ำ มนุษย์ใช้การชลประทานผันน้ำจากแม่น้ำและแหล่งน้ำจืดอื่นๆ มาใช้ในการเกษตร แม่น้ำและ ทะเลเป็นเส้นทางคมนาคมสำคัญที่เปิดโอกาสมนุษย์ได้ท่องเที่ยวและทำการค้าขาย การชะล้างและการกัดกร่อน พื้นดินของน้ำทำให้เกิดภูมิประเทศ อาทิ หุบเขา และสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ ซึ่งเป็น ที่ราบ ที่มีดินอุดมสมบูรณ์เหมาะแก่การเพาะปลูกและการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์ นอกจากนั้นน้ำยังซึมผ่านดินลงสู่ทางน้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินเหล่านี้จะไหลกลับไปอยู่เหนือพื้นดินทางธารน้ำ หรือในบางภูมิประเทศเป็นธารน้ำร้อน หรือน้ำพุร้อน มนุษย์รู้จักนำน้ำใต้ดินมาใช้โดยการสร้างบ่อน้ำ

เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายพื้นฐาน สามารถละลายสารได้ ทั้ง 3 สถานะ ทั้ง แก๊ส ของเหลว และของแข็ง เพราะฉะนั้นเราจึงหาน้ำบริสุทธิ์ได้ยาก เพราะน้ำทั่วไปมีแก๊ส เกลือ และสารอื่นๆ ละลายปนอยู่ ส่วนมากที่พบคือ ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ โซเดียมคลอไรด์ ซัลเฟตไดออกไซด์ ฯ น้ำจากแหล่งต่างๆ จึงมีสี กลิ่น และรสต่างกันไป เพื่อความอยู่รอด มนุษย์และสัตว์ได้พัฒนาประสาทสัมผัสเพื่อแยกแยะน้ำที่ดื่มได้และดื่มไม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น สัตว์บกส่วนมากจะไม่ดื่มน้ำทะเล ที่มีรสเค็ม และน้ำในบึงที่มีกลิ่นเน่าเหม็น แต่จะชอบน้ำบริสุทธิ์ที่มาจาก น้ำพุหรือทางน้ำใต้ดิน

2.5.2 สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

น้ำเป็น สารเคมี ที่เขียน สูตรเคมี ได้ว่า (H_2O) : น้ำ 1 โมเลกุล ประกอบด้วยแก๊ส ไฮโดรเจน 2 อะตอม สร้างพันธะโควาเลนต์รอบแก๊สออกซิเจน 1 อะตอม

สมบัติหลักทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำ ได้แก่

- 1) น้ำเป็นของเหลวที่ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น ที่อุณหภูมิและความดันปกติ สีของน้ำตามธรรมชาติเป็นสีโทนน้ำเงินอ่อนๆ แม้ว่าน้ำดูไม่มีสีเมื่อมีปริมาณน้อยๆก็ตาม น้ำแข็งก็ดูไม่มีสีเช่นกัน และสำหรับน้ำในสถานะแก๊สโดยปกติเราจะมองไม่เห็นมันเลย
- 2) น้ำเป็นของเหลวโปร่งใส ดังนั้นพืชน้ำจึงสามารถอยู่ในน้ำได้เพราะมีแสงสว่างส่องลงมาอย่างทั่วถึง จะมีเพียงแสงอัลตราไวโอเลตเท่านั้นที่ส่องผ่านได้เพียงเล็กน้อย
- 3) น้ำมีสถานะเป็นของเหลวในสภาวะปกติ
- 4) น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว เพราะว่าออกซิเจนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity: EN) สูงกว่าไฮโดรเจน ออกซิเจนมีขั้วลบ ในขณะที่ไฮโดรเจนมีขั้วบวก แสดงว่าน้ำเป็นโมเมนต์ขั้วคู่ ปฏิกริยาระหว่างขั้วของแต่ละโมเลกุลเป็นเหตุให้เกิดแรงดึงดูดที่เชื่อมโยงกับมวลรวมของน้ำของความตึงผิว
- 5) แรงยึดเหนี่ยวสำคัญอื่นๆ ที่ทำให้โมเลกุลของน้ำเสียบเข้าสู่อีกอันหนึ่งเรียกว่า พันธะไฮโดรเจน
- 6) จุดเดือดของน้ำ (รวมถึงของเหลวอื่นๆ) ขึ้นอยู่กับความกดดันของบรรยากาศ เช่น บนยอดเขาเอเวอเรสต์ น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิ $68^{\circ}C$ เปรียบเทียบกับ $100^{\circ}C$ ที่ระดับน้ำทะเล ในทางกลับกัน เขตน้ำลึกในมหาสมุทรใกล้รอยแตกของเปลือกโลกเนื่องจากภูเขาไฟระเบิด อุณหภูมิอาจสูงขึ้นเป็นหลายร้อยองศาและยังคงสถานะเป็นของเหลวเหมือนเดิม
- 7) น้ำจะไหลเข้าหาตัวมันเอง น้ำมีค่าความตึงผิวสูงซึ่งเกิดจากการประสานกันอย่างแข็งแรงระหว่างโมเลกุลของน้ำเพราะว่ามันมีขั้ว ความยืดหยุ่นที่เห็นได้ชัดเกิดจากค่าความตึงผิวคอยควบคุมให้คลื่นมีลักษณะเป็นพริ้ว
- 8) น้ำมีขั้วแม่เหล็กจึงมีสมบัติการยึดติดสูง
- 9) การแทรกซึมของน้ำตามรูเล็กๆกล่าวถึงแนวโน้มของน้ำที่จะไหลอยู่ในหลอดเล็กๆซึ่งต้านกับแรงโน้มถ่วง สมบัตินี้ถูกพึ่งพาโดยพืชสีเขียว เช่น ต้นไม้
- 10) น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี เรียกได้น้ำเป็น ตัวทำละลายสากลสามารถละลาย สารได้หลายชนิด สารที่ละลายกับน้ำได้ดี เช่น เกลือ น้ำตาล กรด ด่าง และแก๊สบางชนิด โดยเฉพาะออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า ไฮโดรฟิลิก หรือสารที่ชอบน้ำ ขณะที่สารที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ได้เลย เช่น ไขมันและน้ำมัน เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก หรือสารที่ไม่ชอบน้ำ

11) น้ำเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญในเซลล์ของร่างกาย เช่น โปรตีน ดีเอ็นเอ และ น้ำตาลโมเลกุลใหญ่ละลายน้ำ

12) น้ำบริสุทธิ์เป็นสารที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดี

13) น้ำมีค่าความร้อนจำเพาะสูงเป็นอันดับ 2 ในบรรดาสารประกอบทั้งหมดที่ค้นพบ แอมโมเนียก็มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูงเหมือนกัน (40.65 kJ/mol) ซึ่งทั้งคู่ก็เป็นผลมาจาก พันธะไฮโดรเจนครอบคลุมเป็นบริเวณกว้างระหว่างโมเลกุล สมบัติที่ไม่ธรรมดา 2 ประการนี้ส่งผล ให้สภาพอากาศบนโลกอุ่นลง

14) ภาวะที่น้ำมีความหนาแน่นสูง คือ ที่อุณหภูมิ 3.98 °C น้ำจะไม่มี ความหนาแน่น เมื่อน้ำแข็งตัว การขยายตัว 9% เป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์ไม่ปกติ เช่น น้ำแข็งลอยอยู่ในน้ำ ดังนั้นน้ำ จึงสามารถอยู่ได้ภายในบ่อน้ำที่กลายเป็นน้ำแข็ง เพราะที่ได้น้ำมีอุณหภูมิประมาณ 4°C

15) สารบางชนิด เช่น โซเดียม ลิเทียม แคลเซียม โพแทสเซียม เป็นต้น เมื่อถูกน้ำจะ ปลดปล่อยแก๊สไวไฟออกมา หรือมีปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำ

2.6 กระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน

(Photocatalytic oxidation) [11]

กระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photoreaction) ซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยานี้เป็นแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis) คือ การเร่งที่ผิวหน้าระหว่างสถานะที่ต่างกันของระบบที่มีมากกว่าหนึ่ง สถานะ โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับ (Adsorbed) ไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้ว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในแง่ของการ จัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลาย

2.6.1 แคตะไลซิส (Catalysis) [9]

ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เข้ามาช่วยเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เรียกว่าปฏิกิริยาแคตะไลซิส (Catalytic Reaction หรือ Catalysis) ปฏิกิริยาแคตะไลซิสสามารถแบ่ง ออกได้เป็น ปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous Reaction) กับปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Reaction) ในปฏิกิริยาแคตะไลซิสแบบเอกพันธุ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ใน สถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวหรือแก๊ส ในปฏิกิริยาแคตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ สารตั้งต้นและตัวเร่ง ปฏิกิริยามีสถานะที่ต่างกัน โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็งและสารตั้งต้นเป็นของเหลวหรือ แก๊ส ในกระบวนการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับระบบวิวิธพันธุ์ ปฏิกิริยาแคตะไลซิสแบบ วิวิธพันธุ์ทุกปฏิกิริยาจะเริ่มต้นด้วย การดูดซับ (Adsorption) แก๊สที่ทำปฏิกิริยา (Reacting Gases) บน

พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้พันธะภายในโมเลกุล (Intramolecular Bond) อ่อนแอลง ถัดมาสปีชีส์ (Species) ที่ถูกดูดซับจะทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวซึ่งจะมีหลายขั้นตอนและสุดท้ายผลิตภัณฑ์จะเกิดการคายซับ (Desorb) ออกจากพื้นผิวในสถานะแก๊ส [17]

มีตัวแปรหลายตัวที่ส่งผลต่อปฏิกิริยา เช่น การเป็นพิษ (Poisoning) การอุดตัน (Fouling) การรวมตัวเนื่องจากความร้อน (Sintering or Migration) การสูญเสียสปีชีส์ที่ว่องไว (Loss of active species) และอื่นๆ เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) ไมโครสโคปี (Microscopy) ดิฟแฟรกชัน (Diffraction) เป็นต้น

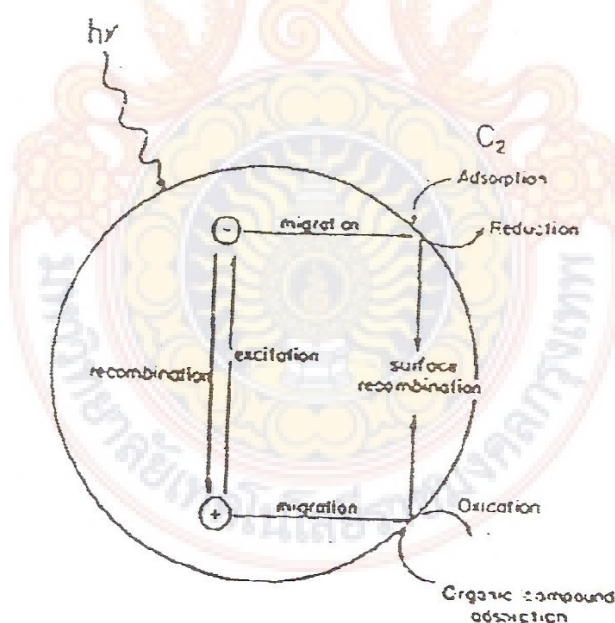
อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยหนึ่ง หรือหลายองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวอยู่บนตัวรองรับ (Support) ที่มีพื้นที่ผิวมาก ตัวรองรับเป็นส่วนที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจริงๆ มาเกาะอยู่ พื้นที่ผิวข้างนอกของตัวรองรับจะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนใหญ่จะอยู่ภายในรูพรุนและตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในรูพรุนเหล่านั้น ตัวรองรับสามารถมีพื้นที่ผิวในรูพรุนได้ตั้งแต่ $1 - 1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปกระจายตัวอยู่บนตัวรองรับทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น จุดประสงค์หลักของการใช้ตัวรองรับก็เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งการกระจายตัวที่เหมาะสมขององค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวและความเสถียร เมื่อเกิดการรวมตัวเนื่องจากความร้อน (Sintering) อย่างไรก็ตามกระบวนการโดยรวมจะเกิดที่องค์ประกอบที่ว่องไวกับที่ตัวรองรับ [17]

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชันนี้ เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจการเกิดปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องศึกษา และทำความเข้าใจกับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ซึ่งมีความกว้าง E_g กันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [11]

กระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน ในเฟสน้ำ (Aqueous Phase) คือ กระบวนการโฟโต - ออกซิเดชัน (Photo Oxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (Photon) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน E_g ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h_{vb}^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ e_{cb}^- ซึ่ง h_{vb}^+ และ e_{cb}^- สามารถที่จะกลับมามีอยู่ในสภาวะเดิมได้อีก เรียกว่า รีคอมไบเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid-Liquid interface) อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในสารละลายเรียกว่า ปฏิกริยารีดักชัน (Reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (Donor) ในสารละลายไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) (รูปที่ 2.8) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรองรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong - oxidation)



รูปที่ 2.8 การเกิดโฮลและอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ [11]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันคือ ไททาเนียม เนื่องจาก

- 1) มีเสถียรภาพต่อสารเคมี ไม่ละลาย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในปริมาณสูง
- 2) มีประสิทธิภาพ ราคาสูงและไม่มีอันตราย
- 3) มีช่องว่างพลังงาน E_g ไม่สูง ($E_g > 3.2$ eV) และดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่ำ

ประมาณ 390 nm.

2.6.2 กระบวนการบำบัดโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากไททาเนียมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานการกระตุ้นจากแสงยูวี ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชัน เกิดเป็น e_{cb}^- และ h_{vb}^+ ดังสมการ



ในสถานะที่ไม่มีตัวให้หรือรับอิเล็กตรอน (Electron donor หรือ Electron acceptor) e_{cb}^- และ h_{vb}^+ ที่เกิดขึ้นจะกลับมารวมตัวกันอีกภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว ประมาณ 1×10^{-9} วินาที (Nanoseconds) และจะได้รับความร้อนออกมา ดังสมการ



h_{vb}^+ อาจทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโมเลกุลของสารที่ติดกับผิวของอนุภาค TiO_2 หรือทำปฏิกิริยากับ OH^- และ H_2O ที่ติดกับผิวของอนุภาค TiO_2 OH^- และ H_2O เกิดเป็น $OH^\bullet$ ดังสมการ



e_{cb}^- ในบางกรณีอาจทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารประกอบที่จะบำบัด หรือโดยส่วนใหญ่แล้วจะทำปฏิกิริยากับ O_2 เป็น $O_2^{\bullet-}$, $O_2^{\bullet-}$ ดังสมการ



ซึ่ง $O_2^{\bullet 2-}$ จะทำปฏิกิริยาต่อไปจนได้เป็น H_2O_2 ดังสมการ





ซึ่ง H_2O_2 ที่เกิดขึ้นจากการฉายแสงยูวีไปยัง TiO_2 ก็สามารถทำให้เกิด $OH^{\bullet}$ ได้ดังสมการ (2.14) (เช่นเดียวกับกระบวนการ UV/ H_2O_2)



หรือสามารถทำปฏิกิริยากับแสงยูวีโดยตรง เกิดเป็น $OH^{\bullet}$ ได้ดังสมการที่ (2.14) (เช่นเดียวกับกระบวนการ UV/ H_2O_2)



$OH^{\bullet}$ ที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการบำบัดต่อไป

นอกจากนี้ Matthew ได้ให้ความเห็นว่า สมการที่ (2.10) และ (2.11) เป็นปฏิกิริยาหลักในการเกิด $OH^{\bullet}$ บนผิวไททาเนีย ถ้าไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนที่จะมาทำปฏิกิริยากับ e_{cb}^- ที่ผิวไททาเนีย e_{cb}^- และ h_{vb}^+ จะกลับมารวมตัวกันภายในระยะเวลาอันรวดเร็วดังที่กล่าวมาแล้วในสมการที่ (2.9) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ O_2 ในสารละลายจะทำให้ e_{cb}^- ถูกดึงไปทำปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.12) และ (2.13) จึงไม่เกิดการกลับมารวมตัวกันใหม่ เป็นเหตุให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

$OH^{\bullet}$ จะเป็นตัวออกซิไดซ์ดี และสลายพันธะโมเลกุลของสี (Chromophore) ทำให้สีจากเดิมที่เคยสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเปลี่ยนเป็นไม่มีสี

2.6.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติกออกซิเดชัน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Dosage) ความเข้มข้นของสารเริ่มต้น (Initial Substrate Concentration) อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในสารละลาย (Dissolved oxygen) ความเข้มของแสง (Light Intensity) และปริมาณไอออนบวก-ลบในสารละลาย (Dissolved anions – cations)

2.6.3.1 ค่าความเป็นกรด – เบส (pH) ประสิทธิภาพในการโฟโตออกซิเดชันขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด – เบส ในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าความเป็นกรด – เบส มีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย เพราะประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเมื่อค่าความเป็นกรด – เบส สูงหรือต่ำ โดยประจุที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาประจุบวกที่ค่าความเป็นกรด – เบส ต่ำและจะ

เป็นลบที่ค่าความเป็นกรด – เบสสูง สำหรับไททาเนียมไดออกไซด์ค่าความเป็นกรด – เบส ที่ทำให้ประจุเป็นกลางจากการศึกษาของ Tang และคณะได้สรุปว่าไฮโดรอกซิลเรดิคัล ($h\nu^+$) จะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโต-แคตะไลซิส (Photocatalysis) เมื่อค่าความเป็นกรด – เบสน้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^\bullet$) มีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าความเป็นกรด – เบสมากกว่า 3 นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด – เบสที่เปลี่ยนแปลงไปแล้วยังทำให้ค่าช่องว่างพลังงาน Eg ของสารกึ่งตัวนำประเภทเมทัล - ออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้ (0.059 mV/pH unit)

สีย้อมผ้าต่างชนิดกันมีความสามารถในการที่จะสลายตัวได้ ในสภาวะค่าความเป็นกรด – เบส ซึ่งการสลายตัวนี้มีผลมาจากความสามารถในการดูดกลืนของสีย้อมผ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

2.6.3.2 ความเข้มข้นของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^\bullet$) ทำปฏิกิริยาและเร่งปฏิกิริยาการกำจัดสี และไททาเนียมไม่เพียงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยิดเกาะ การยิดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา

ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลาย จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโต - ออกซิเดชันลดลงเนื่องจากอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไป จะไปขัดขวางแสงยูวีที่ส่องลงไป ในสารละลาย ทำให้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคของแสงยูวีที่ส่องลงไป ในสารละลาย ทำให้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคของแสง (Photon : $h\nu$) และปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชันส่วนใหญ่จะมีปริมาณความเข้มข้น 1 – 5 g/L

2.6.3.3 ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น ข้อมูลวิจัยจำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสีย้อมผ้าตั้งต้นที่ต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง Davis และคณะได้ชี้ให้เห็นว่าแสงยูวีจะถูกดูดซับทั้งจากอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระจายอยู่ในสารละลายและสีย้อมผ้าในสารละลาย ซึ่งเป็นผลในการลดการส่องผ่านของแสงยูวี แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสารตั้งต้นด้วยเหมือนกัน ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนต่ำ เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด แต่หากโครงสร้างมากขึ้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามจากการศึกษาของ Gupta ได้ทดสอบสารพีซีอี (Perchloroethylene, PCE) ผลที่ได้คือประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพีซีอีตั้งต้นสูงขึ้น

2.6.3.4 อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการกำจัดสีในสารละลายเพิ่มขึ้น Bing – Nan และคณะ ได้ทำการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 55°C ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่ามากกว่าเป็น 2 เท่าที่อุณหภูมิ 25°C และเมื่อจากทฤษฎีทางจลนศาสตร์ (Kinetic theory) อุณหภูมิ นับเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius) เขียนได้ดังนี้

$$k = Ae^{-E_a / RT} \quad (2.21)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, $(\text{min})^{-1}$ (Reaction Rate Constant, min^{-1})

A = แฟกเตอร์แห่งความถี่, $(\text{min})^{-1}$ (Frequency Factor or Pre – Exponential, min^{-1})

R = ค่าคงที่ = $8.3143 \text{ J mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Constant = $8.3143 \text{ J mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) (Absolute Temperature, K)

ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึม (Logarithm) ที่เขียนกราฟระหว่างค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา (k) กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ $1/T$

$$\ln k = -E_a / RT + \ln A \quad (2.22)$$

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ (Recombination) และอาจเนื่องมาจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและอาจเนื่องมาจากการลดลงของพลังงานการกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา

2.6.3.5 ปริมาณออกซิเจนละลาย อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ e_{cb}^- ที่แถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออน และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ นอกจากนั้นออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล

2.6.3.6 ความเข้มข้นของแสง เนื่องจากความเข้มข้นของแสงโดยตรง (ความเข้มแสง คือพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา; อนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ ν มีพลังงาน $E = h\nu$ คิดเป็น 1 ควอนตัม) ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวโลหะเป็น E_T ดังนั้นจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบน = พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบน/พลังงานของแสง 1 โฟตอน

$$E_T = h\nu$$

จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ 1 วินาที = ความเข้มของแสง/ h

ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้ตั้งสมมุติฐานว่า 1 โฟตอนจะทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ดังนั้นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอน $\propto$ ความเข้มแสงเพื่อที่จะกระตุ้นไททาเนียม-ไดออกไซด์ให้เกิด e^- และ h^+ ต้องใช้ความยาวคลื่นแสงที่ส่องประมาณ 390 nm หรือต้องมีพลังงานอย่างน้อย 3.2 eV Ollis และคณะ ได้สรุปผลของความเข้มของแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไว้ว่า ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงปานกลางอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มแสง และอัตราเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่เมื่อถึงจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Mass Transfer Limit) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการสลายตัวของควอนตัม (Quantum efficiency of degradation = สัดส่วนของการสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้) จะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำและจะแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลางและจะแปรผกผันกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มสูง

Kawakuchi ได้สรุปเกี่ยวกับสมการ Langmuir – Hinshelwood kinetic rate ไว้ว่าที่ระดับความเข้มแสงสูง การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) จากปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First order) ไปสู่รากที่สอง (Square root order) เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และที่ระดับความเข้มแสงต่ำ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เปลี่ยนจากปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ไปสู่ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero order) เมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

2.6.3.7 ปริมาณไอออนบวก-ลบ ในสารละลาย โดยปกติแล้วน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีสารอนินทรีย์ (Anious หรือ Cations) ประกอบอยู่ด้วยนอกเหนือจากสารอินทรีย์ เช่น เหล็ก (III) (Fe^{3+}) เหล็ก (II) (Ferrous) แมงกานีส (Manganese) สังกะสี (Zing) คลอไรด์ (Chloride) คาร์บอเนต (Carbonate) ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) ซัลเฟต (Sulfate) ไนเตรต (Nitrate) และฟอสเฟต (Phosphate) ซึ่งไอออนบางชนิดจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาและบางชนิดจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา น้ำเสียที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ หากมีความเข้มข้นของโลหะสูงในน้ำเสียนั้น อาจจะต้องทำการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดโลหะออกบางส่วน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน

ความเข้มข้น 1 mM CO_3^{2-} , 0.2 มิลลิโมลาร์ Al^{3+} 0.5 มิลลิโมลาร์ Zn^{2+} สามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของคลอโรฟอร์ม (Chloroform) ได้ 50%, 70% และ 60% ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม $Fe(III)$ จะเพิ่มอัตราการกำจัดฟีนอล (Phenol) อาจเนื่องมาจาก $Fe(III)$ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลเพิ่มขึ้น และปริมาณสารเงิน (Ag) พรอท (Hg)

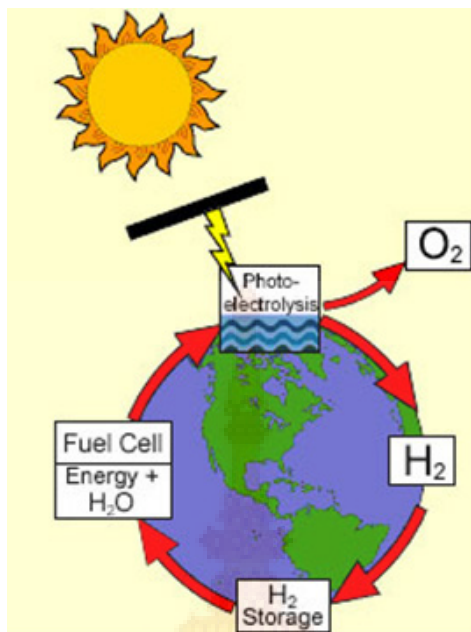
ทองแดง (Cu) แพลทินัม (Pt) หรือแคดเมียม (Cd) แต่ละชนิดเท่ากับ 0.49 mM สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของกรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) ในสภาวะขาดแคลนออกซิเจนได้

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โดยปกติแล้วจะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่ง Bing – Nan และคณะ ได้ศึกษาพบว่าคาร์บอเนต เป็นตัวยับยั้งการกำจัดสีมากที่สุด รองลงมาได้แก่ คลอไรด์ (Cl^-) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Haarstrick และคณะ พบว่าไบคาร์บอเนต Halmann ได้ศึกษาพบว่าคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต ไนเตรต และเปอร์คลอเรตไอออน (Perchlorate Ions) มีผลเล็กน้อยต่อปฏิกิริยาโฟโต-ออกซิเดชัน

ในสภาวะความเป็นเบส อัตราการสลาย 2, 4, 6 – TCP (2, 4, 6 - Triclorophenol) โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อคลอไรด์ไอออนมีความเข้มข้นมากกว่า 60 mg/L การเกิดปฏิกิริยาสามารถถูกขัดขวางได้โดยประจุบวก เช่น Na^+ เนื่องจากประจุบวกสามารถที่จะรับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส และทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ จากการทดลอง Davis และ Huang สรุปได้ว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อันเนื่องมาจากไอออนที่เปลี่ยนไป ซึ่งนี่คือข้อดีอย่างหนึ่งของการใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิส

2.7 การแยกโมเลกุลของน้ำเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน (Water Splitting) [7]

แนวความคิดของกระบวนการแยกโมเลกุลน้ำ (Water Splitting Reaction) เพื่อผลิตพลังงานไฮโดรเจน ได้ถูกพัฒนาขึ้นเนื่องจากความมั่นใจที่ว่า กระบวนการนี้สามารถเป็นแหล่งของพลังงานอย่างที่ยั่งยืน (Sustainable Energy) แหล่งของสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิตพลังงานในกระบวนการนี้คือ น้ำ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้อย่างไม่จำกัด นอกจากนี้พลังงานไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ก็ไม่มีการอื่นที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมมาเจือปนอีกด้วย

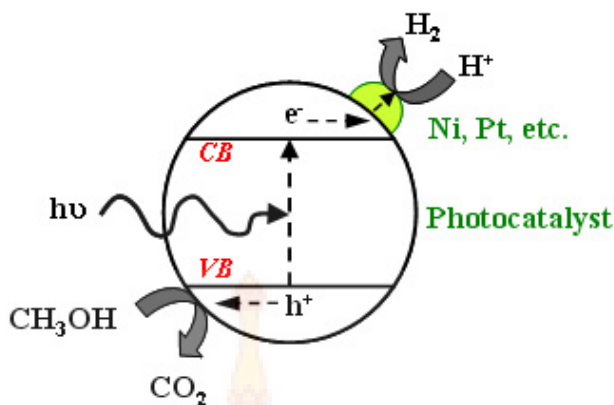


รูปที่ 2.9 การแยกโมเลกุลน้ำด้วยแสงอาทิตย์และสารกึ่งตัวนำเพื่อผลิตพลังงาน ไฮโดรเจน [7]

แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ดูดความร้อนสูงเพื่อใช้ในการผลิตไฮโดรเจน แหล่งของพลังงานความร้อนในอุดมคติที่สามารถจะนำมาใช้งานได้ต้องเป็นแหล่งที่สามารถหาได้ในปริมาณมากเพียงพอและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งของพลังงานที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ (Renewable resource) มีความเหมาะสมเป็นอย่างมากสำหรับนำมาใช้งานในกระบวนการแยกโมเลกุลน้ำ นอกจากนี้การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตพลังงานไฮโดรเจนจากกระบวนการแยกโมเลกุลน้ำ ยังเป็นวิธีการที่น่าสนใจเป็นอย่างมากในมุมมองของการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี นับจากอดีตจนถึงปัจจุบันนี้ ได้มีการพัฒนาระบบทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับพลังงานรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยสารเคมีที่เราเรียกกันว่าสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถแยกโมเลกุลน้ำขึ้นได้ กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีดังกล่าวโดยใช้สารกึ่งตัวนำทั้งแบบโลหะเดี่ยวและโลหะผสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ มีข้อดีหลายประการได้แก่ ประหยัดค่าใช้จ่าย ทนทานต่อการเสื่อมสภาพ ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถดำเนินการได้อย่างปลอดภัย

ในกลุ่มของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ไททาเนียได้รับความสนใจมากที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการกำจัดสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสงร่วมต่าง ๆ นับจากมีการริเริ่มคิดค้นการนำไททาเนียออกไซด์ทรอด (TiO_2 electrode) มาใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสง (Photoelectrochemical Process)

สำหรับการแยกโมเลกุลน้ำโดยกลุ่มนักวิจัยชาวญี่ปุ่นได้แก่ Fujishima และ Honda ในปี 1972 ทำให้จนถึงปัจจุบันนี้มีความสนใจอย่างต่อเนื่องในการนำไททาเนียมมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตพลังงานไฮโดรเจนภายในระบบที่มีการฉายแสง เมื่อไททาเนียมทำการดูดซับโฟตอน ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานในระดับ คอนดักชันแบนด์ (Conduction Band, CB) และวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band, VB) หรือเป็นที่รู้จักกันว่าพลังงานแบนด์แกป (Energy Band Gap) จะทำให้เกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดคอนดักชันแบนด์อิเล็กตรอน (Conduction Band Electron, e^-_{cb}) และวาเลนซ์แบนด์โฮล (Valence Band Hole, h^+_{vb}) ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้ว ไฮโดรเจนไม่สามารถถูกผลิตขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพบนพื้นผิวของไททาเนียมที่ยังไม่ได้รับการปรับแต่ง เนื่องจากพลังงานแบนด์แกปของไททาเนียมมีค่าสูงคือ 3.2 eV สำหรับไททาเนียมชนิดอนาเทส (Anatase) และ 3.0 eV สำหรับไททาเนียมชนิดรูไทล์ (Rutile) ทำให้เกิดการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย การแก้ไขข้อจำกัดนี้โดยมีประสิทธิภาพทำได้โดยใช้สารที่เอื้อให้เกิดปฏิกิริยา (Sacrificial reagent) เช่น เมทานอล ซึ่งสารนี้จะเข้าร่วมในปฏิกิริยาโดยการกำจัดโฮลด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่วาเลนซ์แบนด์ ในขณะที่ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนสามารถเกิดที่คอนดักชันแบนด์ด้วยกระบวนการรีดักชันของน้ำด้วยอิเล็กตรอน นอกจากนี้ การแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่งคือการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม ซึ่งโดยส่วนมากแล้วจะเป็นโลหะทรานซิชัน เช่น นิกเกิล (Ni) แพลตินัม (Pt) เป็นต้น ลงไปบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลักไททาเนียม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมเหล่านี้จะทำหน้าที่เร่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากวาเลนซ์แบนด์หลังจากการดูดซับแสง และกระตุ้นด้วยแสงแล้วปล่อยสู่ระบบ ซึ่งก็คือ การเกิดปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนที่คอนดักชันแบนด์ได้เร็วขึ้นโดยสรุป กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาแยกโมเลกุลน้ำเมื่อทำการแก้ไขข้อจำกัดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาแยกโมเลกุลน้ำ [7]

2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชฎาภา ษยามานนท์ [5] ศึกษาการสังเคราะห์สารดูดซับจากโซลเจลและคุณสมบัติในการดูดซับสารระเหยอินทรีย์ในการสังเคราะห์ใช้ Tetraethoxysilane (TEOS) เป็นสารตั้งต้นและสารลดแรงตึงผิวเป็น Template โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ (1) ชนิดของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ Cationic Type: Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) , Anionic Type: Sodium Dodecyl Sulfate(SDS) และ Nonionic Type: Polyoxyethylene Cetyl Ether (Brij56) (2) อัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่อ TEOS (3) อัตราส่วนโดยโมลของสารลดแรงตึงผิวต่อ TEOS (4) สภาวะกรดและเบส และศึกษาความสามารถในการดูดซับโทลูอินและฟอร์มาลดีไฮด์

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชของสารละลายตั้งต้นสูงขึ้น และอัตราส่วนโดยโมลของสารลดแรงตึงผิวต่อ TEOS เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสารระเหยอินทรีย์เพิ่มขึ้นด้วย แต่ในการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อสังเคราะห์โดยใช้ CTAB เป็น Template และพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ CTAB ต่อ TEOS เท่ากับ 0.375 ในสภาวะด่าง มีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด โดยสามารถดูดซับโทลูอินได้ 1.2693 กรัมโทลูอิน/กรัมสารดูดซับ และสามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 1.1297 กรัมฟอร์มาลดีไฮด์/กรัมสารดูดซับ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของ Xerogel กับ สารดูดซับที่สังเคราะห์โดยใช้ Template เทคนิค พบว่า ความสามารถในการดูดซับโทลูอินและฟอร์มาลดีไฮด์ของ Xerogel ต่ำกว่ามาก

จินดา เงินสุทธิชัย และ จิรวดี ศรีธรา [4] ศึกษาวิธีการสังเคราะห์นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพื่อให้ได้โครงสร้างผลึกชนิด อนาเทส โดยใช้เทคนิคการสังเคราะห์ที่เรียกว่า โซล - เจล (sol - gel) โดยผลึก อนาเทส ของ TiO_2 นี้มีข้อได้เปรียบในแง่ของการเพิ่มพื้นที่ผิของ

อนุภาค ซึ่งจะมีประโยชน์เป็นอย่างมากในเชิงการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารตั้งต้นของการสังเคราะห์ TiO_2 ด้วยเทคนิค sol – gel ในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้สารละลายของ ไททานิล ซัลเฟต (titanyl sulfate) ซึ่งสารนี้เป็นเกลืออนินทรีย์ของไททานเนียม แทนการใช้ไททานเนียม อัลคอกไซด์ (titanium alkoxide) จากงานวิจัยพบว่า titania sol ที่ได้มีความเสถียรสูงพอสมควร ลักษณะผลึก TiO_2 ที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวละเอียดขนาดของอนุภาคก่อนทำ calcinations จะอยู่ในช่วงแคบ เมื่อตกผลึก TiO_2 โครงสร้าง anatase ที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10 – 20 nm ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ calcinations อยู่ในช่วง 400 – 600 °C ผงวัสดุนาโน TiO_2 ที่ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างโดยเทคนิคหลายๆ ชนิด ซึ่งได้แก่ SEM , TEM, XRD, FTIR, DSC, TGA/DTA

Thammanoon Sreethawong และคณะ [18] สังเคราะห์ไททานียที่มีอนุภาคนาโนโดยเติมแพลทินัมลงไปโดยวิธีโซล-เจล ในการสังเคราะห์กำหนดให้เติมแพลทินัมร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้คือมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่ดี เนื่องจากมีขนาดนาโน พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนมาก เมื่อนำไปทดสอบมีการกำหนดเวลาในการให้แสงและกำหนดค่า pH ความเข้มข้นของสารละลาย พบว่าในสภาวะที่เหมาะสมสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ดี

ธนิศร์ แก้วจรัส , สุทธาสินี เสถียรจุกิจานนท์ และพิรณัฐ อรุณคุณารักษ์ [6] ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเพราะในปัจจุบันอัตราการใช้น้ำมันปิโตรเลียมมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นโอกาสที่จะทำให้เกิดการขาดแคลนน้ำมันก็สามารถเป็นไปได้ จึงทำให้เกิดแนวคิดว่าน่าจะนำเชื้อเพลิงอื่นมาใช้ทดแทน เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นสิ่งที่เลือกจะนำมาศึกษา เพราะเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดและไม่เกิดมลพิษ โดยทางกลุ่มได้นำน้ำมาทำการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน แต่เนื่องจากแก๊สที่ได้นั้นไม่เพียงพอต่อการจุดระเบิดเนื่องจากเวลาในการศึกษาของปีการศึกษามีจำกัด ทางกลุ่มจึงได้ตกลงใจที่จะพักการศึกษาในส่วนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าไว้ก่อน และได้ศึกษาส่วนต่อไปคือ การดัดแปลงเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง แก๊สโซลีนโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนจากถังแก๊สและนำแก๊สดังกล่าวเข้าสู่ระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ได้ทำการดัดแปลงไว้แล้วต่อไป

บทที่ 3

วิธีการทำงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ TiO_2 ตลอดจนวิธีการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

3.1.1 สารเคมี

1. ไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium (IV) isopropoxide, Fluka)
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide 85%, Ajax Chemicals)
3. กรดแอซติก (Acetic acid 100%, J.T. Baker)
4. คาร์บอกซิล เมทิล เซลลูโลส (Carboxyl methyl cellulose, CMC, Akucell)
5. โทลูอีน (Toluene)
6. เมทานอล (Methanol)
7. น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์

1. ปิเปต ขนาด 10 mL
2. หลอดหยด
3. บีกเกอร์ ขนาด 50 และ 250 mL
4. กระดาษกรอง Whatman
5. ขวดเก็บสารตัวอย่าง (Vial) ขนาด 5 mL
6. จานเพาะเชื้อ (Petri dishes)
7. ถังเก็บแก๊ส

3.1.3 เครื่องมือ

1. เตาอบ (Oven) Memmert, UFE700
2. เตาเผา (Furnace) Carbolite, CMF1100
3. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) Mettler Toledo, Seven Easy
4. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) Hotplate & Stirrer, Wellab Wsahs 1

5. Brunauer-Emmett-Teller (BET) Philips, PW 1830 generator
6. X – ray diffraction (XRD), D8 Advance
7. Scanning Electron Microscope (SEM) Leo, 1455VP
8. Gas Chromatography (GC), HP 5890 seriesII

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การสังเคราะห์ไททาเนีย (TiO_2) ด้วยวิธีโซล-เจล

1. เตรียมสารละลายไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 0.7 M โดยใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย
2. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 M โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย
3. ค่อยๆเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา จนสารละลายผสมมีค่า pH ประมาณ 9
4. ล้างตะกอนที่ได้จากข้อ 3 หลายๆครั้ง จนกระทั่งน้ำล้างตะกอนมีค่า pH ประมาณ 7
5. นำตะกอนที่ได้จากข้อ 4 มาทำการเปปไทด์ โดยค่อยๆเติมกรดแอซิติกความเข้มข้น 1 M จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH ประมาณ 4.5
6. ทำการกรองสารละลายที่ได้อีกครั้งเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก
7. นำสารละลายที่ผ่านการกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
8. นำเจลที่ได้จากข้อ 7 ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
9. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของ ตัวเร่งปฏิกิริยา ไททาเนียที่สังเคราะห์ได้ด้วย Nitrogen adsorption desorption และใช้แบบจำลอง Brunauer-Emmett-Teller (BET), X – ray diffraction (XRD) และ Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2.2 การสังเคราะห์ไททาเนียโดยมีการเติม CMC ลงไป

1. เตรียมสารละลายไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 0.7 M
2. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 M
3. ค่อยๆเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในสารประกอบไททาเนีย พร้อมทั้งกวนตลอดเวลา จนสารละลายผสมมีค่า pH ประมาณ 9
4. ล้างตะกอนที่ได้จากข้อ 3 หลายๆครั้ง จนกระทั่งน้ำล้างตะกอนมีค่า pH ประมาณ 7

5. นำตะกอนที่ได้จากข้อ 4 มาทำการเปปไทด์ โดยค่อยๆเติมกรดแอซิดิกความเข้มข้น 1 M พร้อมทั้งหยด CMC ที่มีความเข้มข้น 1% ปริมาณ 1 และ 2mL จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH ประมาณ 4.5

6. นำสารละลายจากข้อ 5 ไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

7. นำเจลที่ได้จากข้อ 6 ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

8. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของ ตัวเร่งปฏิกิริยา ไททาเนียที่สังเคราะห์ได้ด้วย

Nitrogen adsorption desorption และใช้แบบจำลอง Brunauer-Emmett-Teller (BET), X - ray diffraction (XRD) และ Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2.3 การแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน โดยการทำปฏิกิริยาร่วมกับแสง

1. เตรียมชุดทดลองในรูปที่ 3.1

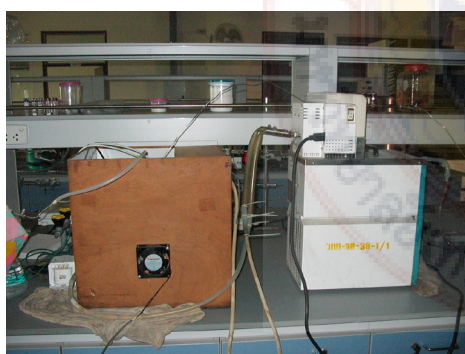
2. เติมน้ำ 80 mL ในน้ำปริมาตร 800 mL ในชุดทดลองที่เตรียมไว้ในข้อ 1

3. ใส่ TiO_2 ปริมาณ 0.3 g ลงไปในชุดทดลอง

4. ทำการฉายแสง UV ขนาด 400 watt ลงในชุดทดลอง ขณะที่ผ่านแก๊สไดรเจนอัตรา 3 mL/s

5. ในระหว่างการทดลอง ทำการเก็บแก๊สตัวอย่างที่ผ่านการฉายแสง ทุกๆ 15 นาที

6. นำแก๊สตัวอย่างที่เก็บได้จากข้อ 5 มาทำการวิเคราะห์โดยเครื่อง Gas Chromatograph ใช้คอลัมน์ชนิด polapak q และตรวจวัดด้วยความแตกต่างของการนำความร้อน (TCD detector)



(a)



(b)

รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในการทำปฏิกิริยาร่วมกับแสง (a) กล่องใส่ชุดทดลอง (b) ชุดทดลองการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่ภายในบรรจุหลอดUV กำลัง 400 watt

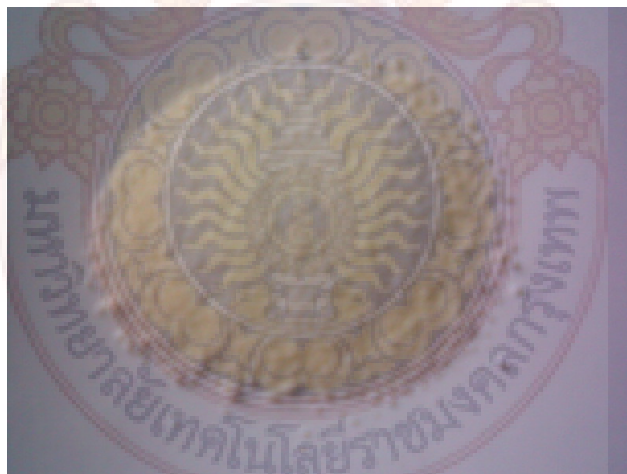
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในการศึกษางานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ไททานีด้วยวิธีโซล-เจล ส่วนที่สองเป็นสังเคราะห์ไททานีโดยมีการเติม CMC ลงไป แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองส่วนไปศึกษาคุณลักษณะโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction (XRD), Brunauer-Emmett-Teller (BET) และ Scanning Electron Microscope (SEM)

4.1 การสังเคราะห์ไททานีด้วยวิธีโซล-เจล

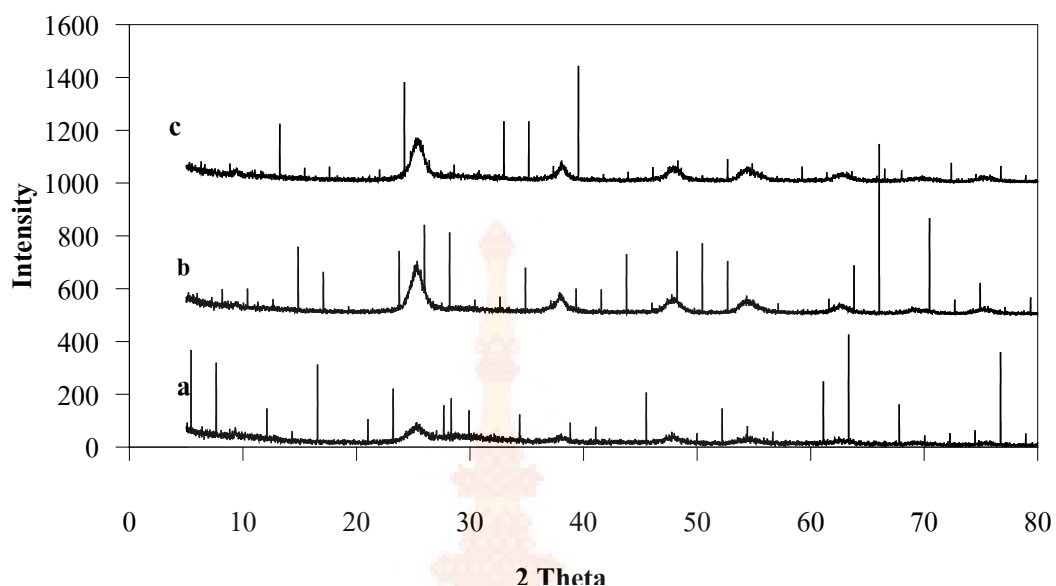
การสังเคราะห์ไททานีด้วยวิธีโซล-เจล พบว่าสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์มีลักษณะเป็นสารละลายใสไม่มีสี หลังจากสังเคราะห์แล้วได้อนุภาคไททานีที่มีขนาดเล็ก เป็นผงฝุ่นสีขาวขุ่นทึบแสง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคไททานีที่สังเคราะห์ได้

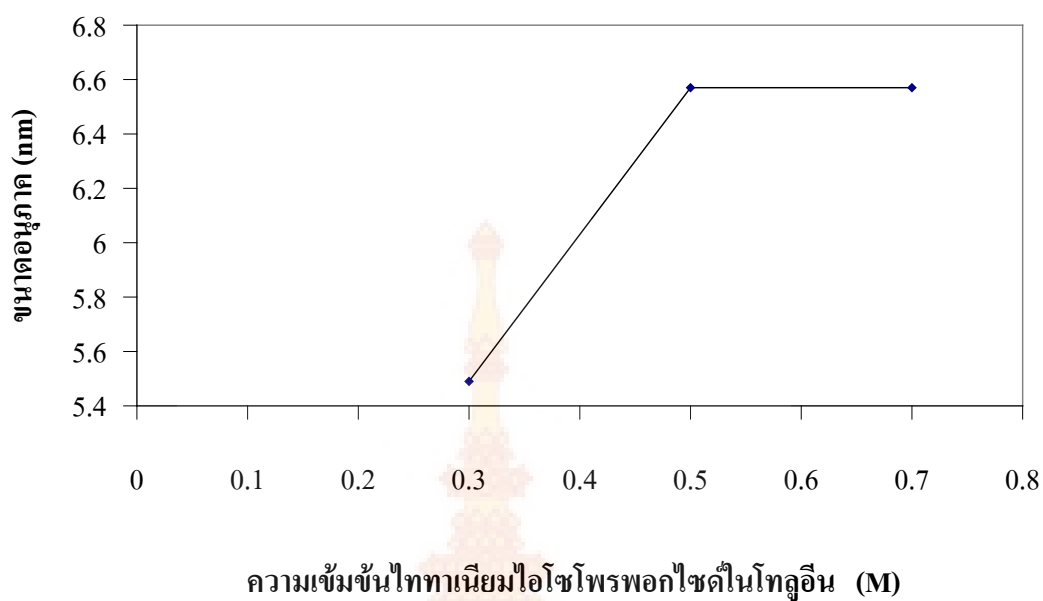
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคไททานีที่สังเคราะห์ได้

เอกซ์-เรย์ดิฟแฟรกชันเป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้าง ค่าความเป็นผลึกของสารจากการวิเคราะห์โครงสร้างของไททานีที่สังเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 และยังสามารถนำผลการวิเคราะห์นี้มาคำนวณหาขนาดผลึกเฉลี่ย เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อขนาดผลึก

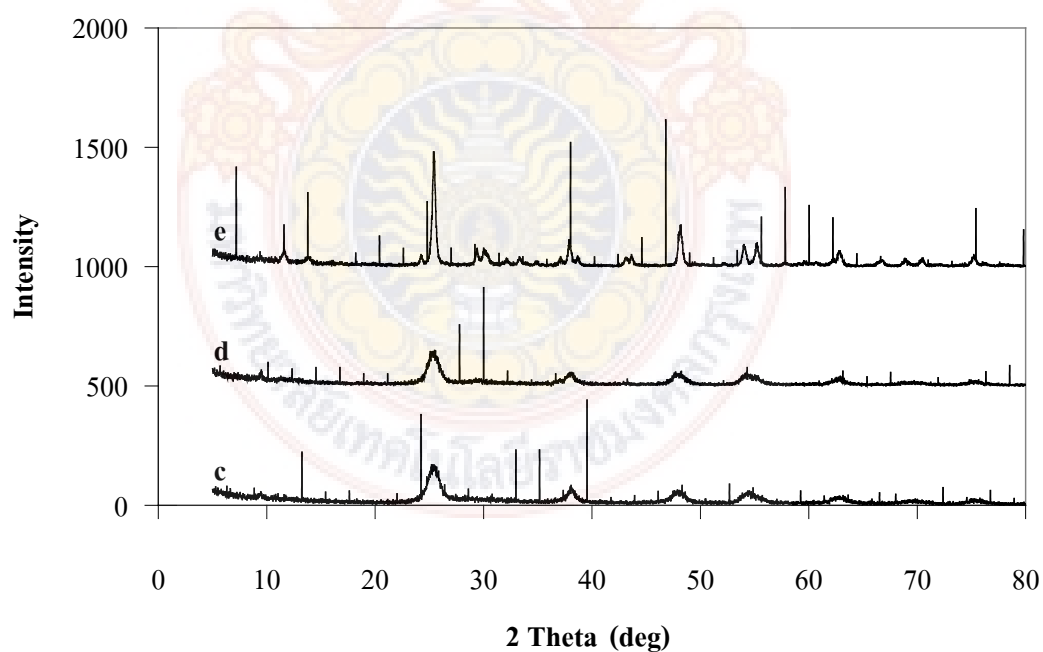


รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไททาเนียที่สังเคราะห์ได้เมื่อ อุณหภูมิแคลไซน์เป็น 400°C และความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ กัน ได้แก่ (a) 0.3 M (b) 0.5 M และ (c) 0.7 M

จากรูปที่ 4.2 พบว่าผลึกไททาเนียที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีโซล-เจลมีเพียงเฟสอนาเทสเท่านั้น ไม่มีเฟสรูไทล์เกิดขึ้น ผลึกอนาเทสมีพีคที่สูงที่สุดที่มุม 2θ เท่ากับ 25.2° และเมื่อนำข้อมูลนี้มาคำนวณขนาดอนุภาคเฉลี่ยได้ค่าดังตารางที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อความเข้มข้นของไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ เพิ่มขึ้น จะทำให้อนุภาค ไททาเนีย มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นหมายความว่าปริมาณไททาเนียมมากขึ้นจึงทำให้อนุภาคมีการชนกันและเกิดการรวมตัวกันมากขึ้น จึงทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความเข้มข้นที่มากขึ้นซึ่งเป็นไปตามข้อมูลในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อขนาดอนุภาคไททาเนีย

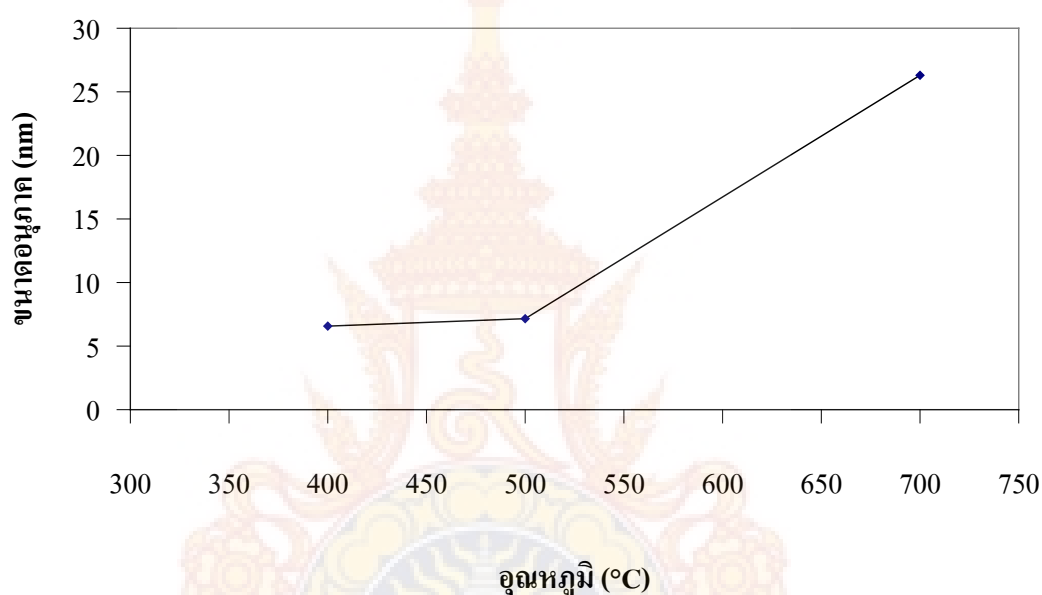


รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์ในโทลูอีน
ต่อขนาดอนุภาคไททานเนียมเมื่อแคลไซน์อุณหภูมิ 400°C



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไททานเนียมที่สังเคราะห์ได้
เมื่อสารละลายมีความเข้มข้น 0.7 M และแคลไซน์ที่อุณหภูมิที่ต่างกัน
คือ (c) 400°C (d) 500°C และ (e) 700°C

จากรูปที่ 4.4 พบว่าพีคที่สูงที่สุดของอนุภาคน้ำที่มุม 2θ เท่ากับ 25.2 ฐานของพีคจะแคบลงเมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น นั่นแสดงว่าอุณหภูมิแคลไซน์มีผลต่อขนาดอนุภาคไททาเนีย คือที่อุณหภูมิแคลไซน์สูงขึ้นจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะไปทำลายพลังงานอิสระบนผิวของแต่ ละอนุภาค ทำให้พื้นผิวของอนุภาคเหล่านั้นมาอยู่ชิดกันมากขึ้นจึงทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแคลไซน์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาค



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิแคลไซน์ต่ออนุภาคไททาเนียเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเป็น 0.7 M

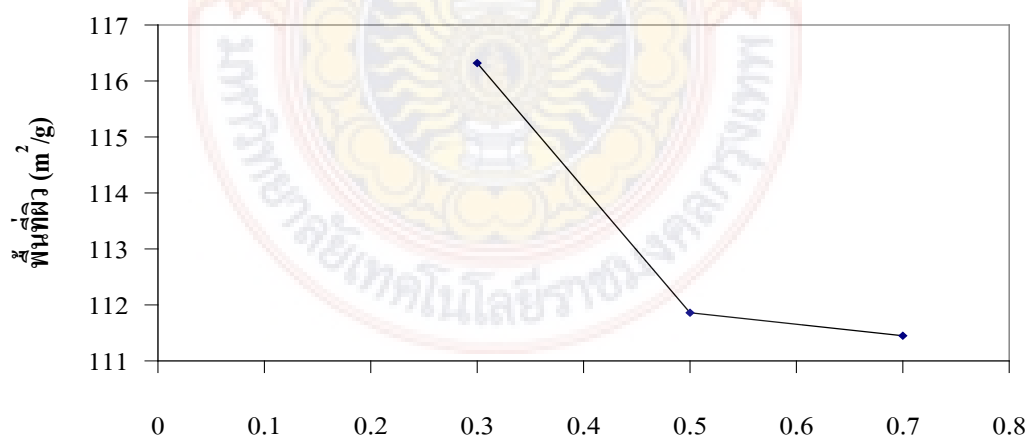
4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของไททาเนียที่สังเคราะห์ได้

ไททาเนียที่สังเคราะห์ได้นำไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวโดยเทคนิคการดูดซับไนโตรเจน และใช้แบบจำลอง BET โดยศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายและอุณหภูมิแคลไซน์ที่มีต่อพื้นที่ผิว เพื่อหาภาวะที่สังเคราะห์อนุภาคไททาเนียให้มีขนาดนาโนและมีพื้นที่ผิวมากที่สุด เพราะต้องการนำไททาเนียที่สังเคราะห์ได้ไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสมบัติดังกล่าวทำให้ไททาเนียมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยามากขึ้น

ตารางที่ 4.1 ขนาดพื้นที่ผิวเฉลี่ย และขนาดผลึกอนาเทสเจส

ตัวทำละลายโทลูอิน	ความเข้มข้น สารละลายไททานเนียมไอโซ โพรพอกไซด์ (M)	อุณหภูมิ แคลไซน์ (°C)	พื้นที่ผิวเฉลี่ย (m ² /g)	ขนาดผลึกเฉลี่ย (Anatase) (nm)
1	0.3	400	116.32	5.49
2	0.5	400	111.86	6.57
3	0.7	400	111.45	6.57
4	0.7	500	93.17	7.16
5	0.7	700	27.75	26.30
6	0.7+(1%CMC,1mL)	400	188.53	6.47
7	0.7+(1%CMC,2mL)	400	196.31	5.26

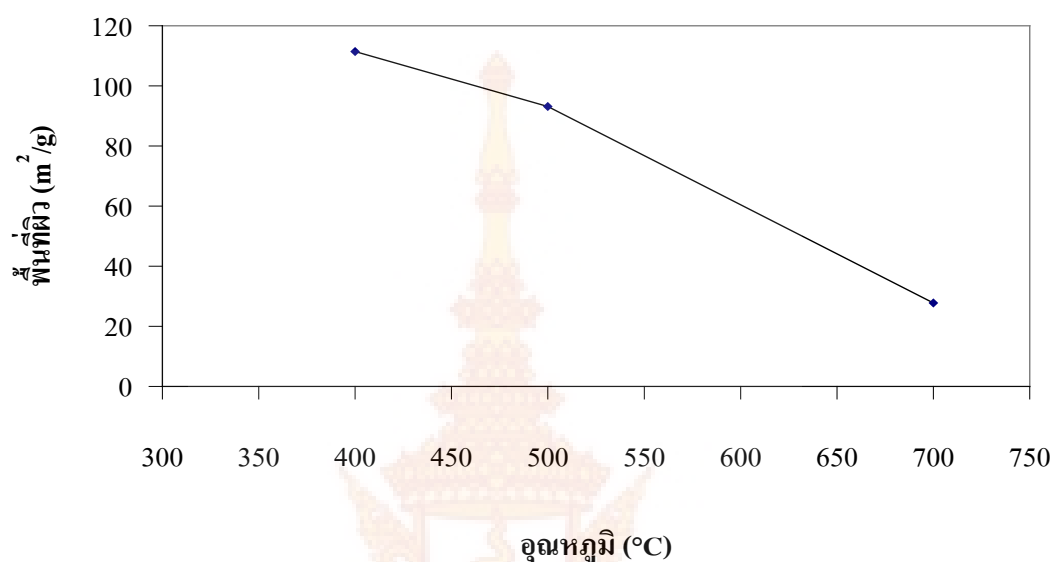
จากการวิเคราะห์พบว่าถ้าใช้ความเข้มข้นสารละลายมากขึ้นคือ 0.3 0.5 และ 0.7 M ที่อุณหภูมิ แคลไซน์ 400°C พบว่าพื้นที่ผิวเฉลี่ยของไททานเนียมที่สังเคราะห์ได้จะลดลง และอนุภาคมีขนาดใหญ่มากขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตาราง 4.1 และรูปที่ 4.6 ดังนั้นผลของเข้มข้นสารละลาย ของไททานเนียม ไอโซโพรพอกไซด์มีผลต่ออนุภาค และพื้นที่ผิวของอนุภาคไททานเนียมเล็กน้อย



ความเข้มข้น สารละลายไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (M)

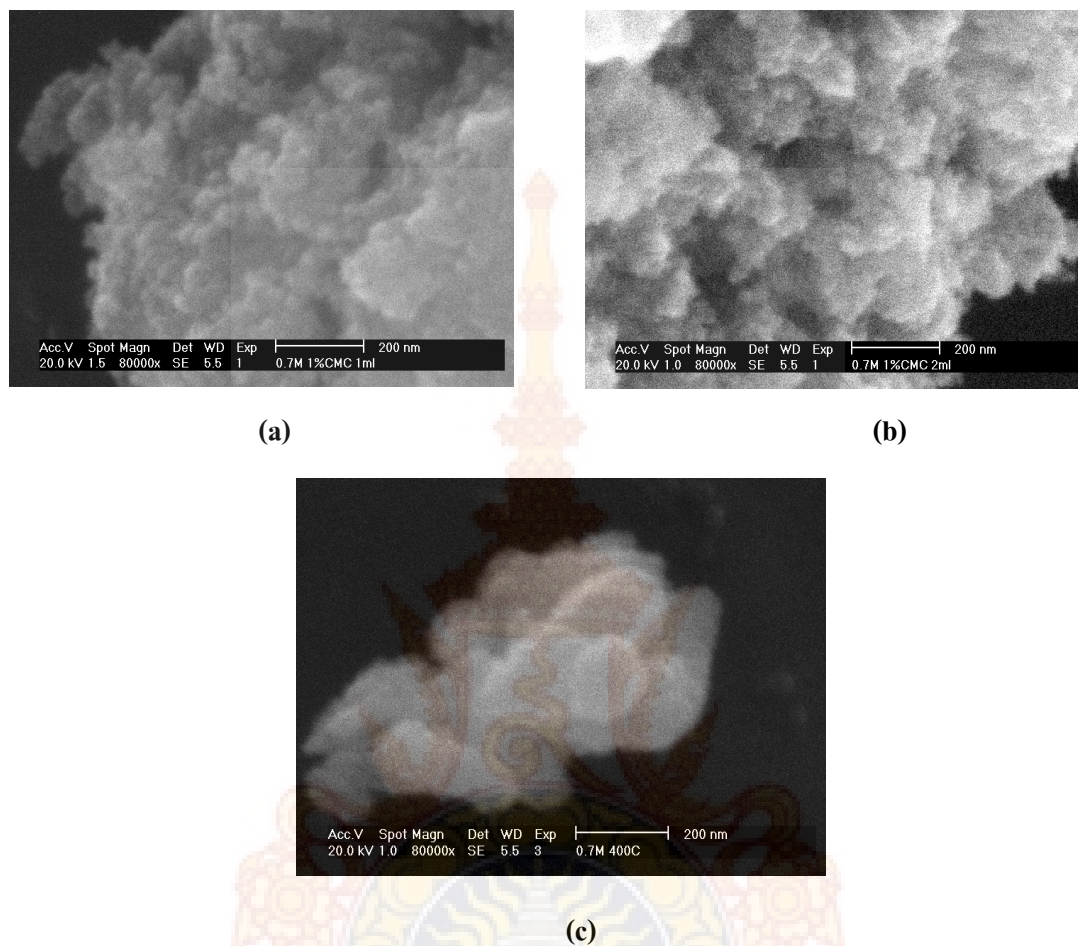
รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อพื้นที่ผิวของไททานเนียมเมอแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C

และเมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิแคลไซน์ที่มีต่อพื้นที่ผิวพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวของไททาเนียที่สังเคราะห์ได้มีขนาดลดลงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิแคลไซน์ต่อพื้นที่ผิวไททาเนียที่ความเข้มข้นของสารละลายไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ 0.7 M

4.1.3 ลักษณะผลึกของไททาเนียที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscops



รูปที่ 4.8 ลักษณะผลึกไททาเนียที่วิเคราะห์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดที่มีกำลังขยาย 80,000 เท่าเมื่อ (a) 0.7M /1%CMC 1ml/400°C (b) 0.7M /1%CMC 2ml /400°C และ (c) 0.7M /400°C

ภาพจากการถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของอนุภาคไททาเนียที่สังเคราะห์ใน สภาวะความเข้มข้นสารละลาย ไททาเนียมไอโซพโรพอกไซด์ 0.7 M และอุณหภูมิแคลไซด์ 400 °C แสดงดังรูปที่ 4.8 C พบว่าผลึกมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ลักษณะพื้นผิวเรียบ ไม่มีความขรุขระและ รูพรุนของพื้นผิว

4.2 การสังเคราะห์ไททาเนียโดยมีการเติม CMC

4.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของไททาเนียที่สังเคราะห์ได้

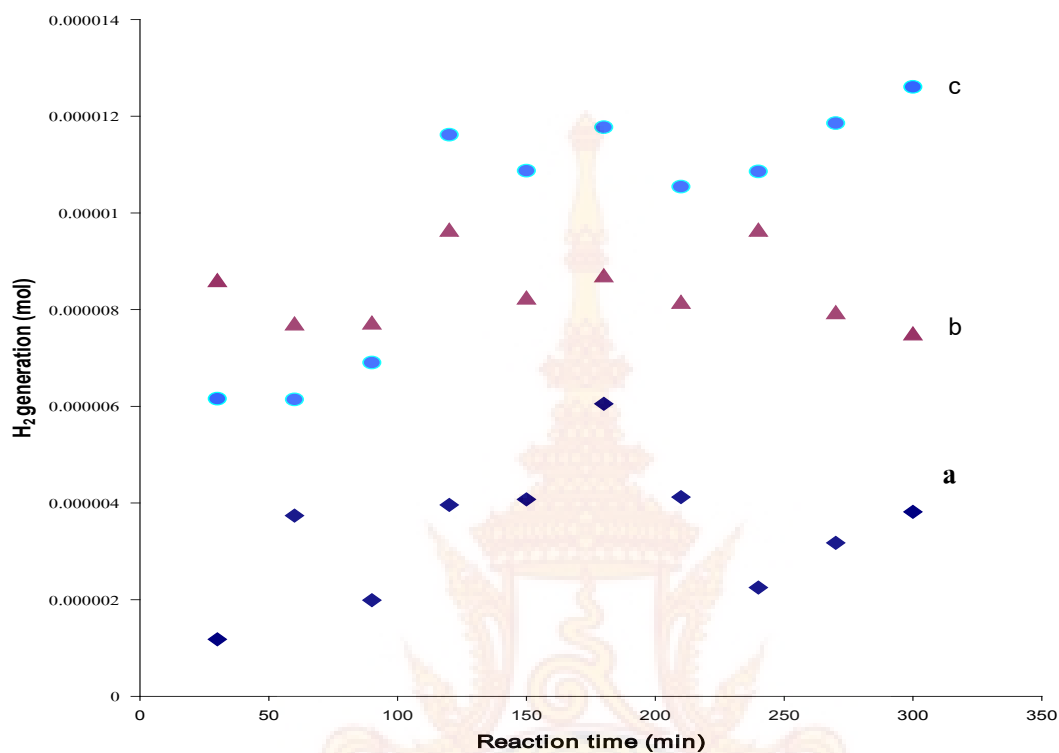
เมื่อเติม CMC ลงไปหลังจากสังเคราะห์แล้วได้ไททาเนียที่มีอนุภาคไม่ต่างไปจากเดิม คือเป็นผงฝุ่น สีขาวขุ่นทึบแสง และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และขนาดอนุภาคพบว่า การเติม CMC ทำให้อนุภาคไททาเนียที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น สังเกตได้จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 และการเติม 1% CMC ปริมาณ 2 mL มีพื้นที่ผิวมากกว่าและขนาดอนุภาคเล็กกว่าการเติมในปริมาณ 1 mL และทั้งที่ไม่มีการเติม CMC ด้วย เนื่องจาก CMC ที่ทำการเติมลงไปส่งผลทำให้อนุภาคไททาเนียไม่สามารถเกิดการรวมตัวกันทำให้อนุภาคของไททาเนียที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคลดลง

4.2.2 ลักษณะผลึกของไททาเนียที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy

จากรูปที่ 4.8 (a) และ (b) เป็นอนุภาคไททาเนียที่มีการเติม CMC ลงไปปริมาณ 1 mL และ 2 mL ตามลำดับ จะเห็นว่าพื้นที่ผิวหน้าของไททาเนียมีความขรุขระและมีรูพรุนมากกว่าไททาเนียที่ไม่มีการเติม CMC รูปที่ 4.8(c) และเมื่อเติม CMC ในปริมาณที่มากกว่าพบว่ามีความขรุขระและรูพรุนมากกว่า อันเกิดมาจากในขั้นตอนการเคลือบ CMC ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอนเกิดการสลายตัวทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของไททาเนีย

4.3 การทดสอบการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน

ในการทดสอบการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน และทำการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนด้วยเครื่อง Gas Chromatograph จากรูปที่ 4.9 พบว่าประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยานั้นขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยา ไททาเนีย ที่สังเคราะห์โดย ทำการเติม 1% CMC จะมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามากกว่าไททาเนียที่ไม่ได้ ทำการเติม 1% CMC ในขั้นตอนการสังเคราะห์ โดยแก๊สไฮโดรเจน ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากที่สุด เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 180 นาที ซึ่งมีปริมาณอยู่ที่ 0.000006 mol, 0.000008 mol และ 0.000012 mol ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลของการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนที่สภาวะต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียดังนี้ (a) 0.7M /400°C, (b) 0.7M /1%CMC /400°C 1 mL และ (c) 0.7M/1%CMC /400°C 2 mL

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาดัชนีแปรต่างๆที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคไททาเนียด้วยวิธีโซล-เจล และผลการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจน

5.1 การสังเคราะห์ไททาเนียด้วยวิธีโซล-เจล

จากการสังเคราะห์ไททาเนียด้วยวิธีโซล-เจล ไททาเนียที่ได้มีลักษณะขนาดเล็กเป็นผงฝุ่นสีขาวขุ่นทึบแสง เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) สามารถบอกได้ว่าอนุภาคมีค่าความเป็นผลึกที่มุม 2θ มีพีคเฟสอานาเทสซีที่ 25.2, 38.3, 48.0, 53.8, 62.7 ตามลำดับ แต่ไม่พบพีคของรูไทล์เกิดขึ้นเนื่องจากเผาที่อุณหภูมิไม่สูงพอ ดังนั้นจึงพบเพียงเฟสอานาเทสเท่านั้น

5.1.1 การศึกษาผลความเข้มข้นต่อขนาดผลึกและพื้นที่ผิวเฉลี่ย

จากการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ย พบว่าการสังเคราะห์ไททาเนียด้วยวิธีโซล-เจล ทำให้ได้ไททาเนียที่มีอนุภาคนาโน ในการทดลองนี้พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น และพื้นที่ผิวน้อยลง ความเข้มข้นที่ทำให้การสังเคราะห์ไททาเนียมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดคือที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.3 M

5.1.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อขนาดผลึกและพื้นที่ผิวเฉลี่ย

เมื่อสังเคราะห์ไททาเนียที่ความเข้มข้นสารละลายเท่ากัน แต่เปลี่ยนอุณหภูมิแคลไซน์ พบว่าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C ให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุด พื้นที่ผิวน้อยที่สุด และอนุภาคจะใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวน้อยลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

5.2 การสังเคราะห์ไททาเนียโดยมีการเติม CMC

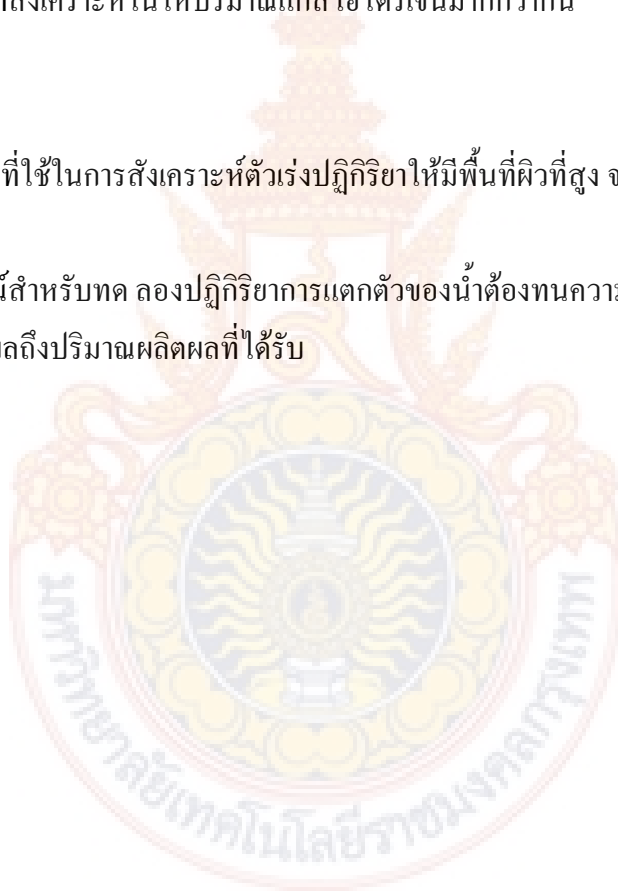
หลังจากสังเคราะห์แล้วพบว่า การเติม CMC ทำให้อนุภาคไททาเนียที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และการเติม 1% CMC ปริมาณ 2 mL มีพื้นที่ผิวมากกว่าและขนาดอนุภาคเล็กกว่าการเติมในปริมาณ 1 mL และทั้งที่ไม่มีการเติม CMC ด้วย ก็ยังมีพื้นที่ผิวสูงถึง 196.31 m²/g

5.3 การแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน

หลังจากทำการแยกโมเลกุลน้ำเพื่อผลิตไฮโดรเจนที่สภาวะต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนีย และทำการวิเคราะห์ แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph พบว่าปริมาณของไฮโดรเจนที่แยกได้ด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง นั้นขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียโดยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียที่สังเคราะห์ใน สภาวะไม่มีการเติม 1% CMC ลงในอนุภาคไททาเนีย จะให้ ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียที่สังเคราะห์ใน สภาวะที่มีการเติม 1% CMC แต่ที่สภาวะการเติม 1% CMC ที่ 1 และ 2 mL ไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าสภาวะ ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียที่สังเคราะห์ในให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากกว่ากัน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ถ้าค้นหาวีธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีพื้นที่ผิวที่สูง จะยังทำให้ปฏิกิริยาการแยกน้ำเกิดได้ดียิ่งขึ้น
2. ชุดอุปกรณ์สำหรับทดลองปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำต้องทนความร้อนได้สูง และต้องไม่มีรอยร้าว เพราะจะมีผลถึงปริมาณผลิตผลที่ได้รับ



เอกสารอ้างอิง

- [1] กุลยา ศิริวารีกุล. 2548. การย่อยสลายสีย้อมไดเรคท์เรด 80 โดยใช้แสงและอนุภาคระดับนาโนของไททานเนียมไดออกไซด์เป็น แคตะลิสต์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [2] คณะผู้จัดทำเคมี. 2526. เคมีทั่วไปเล่ม 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2527. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานการประยุกต์. หน้า 63-88. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] จินดา เงินสุทธิชัยพร และจิรวดี ศรีธรา. 2548. การสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของไททานเนียมไดออกไซด์จากไททานิล ซัลเฟตโดยใช้เทคนิคโซล-เจล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] ชฎาภา ทรายามานนท์. 2547. การผลิตและศึกษาสารดูดซับจากโซลเจลสำหรับการดูดซับสารระเหยอินทรีย์ (VOCs). วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.
- [6] ธนิศร์ แก้วจรัส, สุทธาสินี เสถียรจิกานนท์ และพินุช อรุณคุณารักษ์. 2544. การใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [7] ธรรมบุญ ศรีทวงศ์. 2549. “พลังงานไฮโดรเจนจากน้ำด้วยแสงอาทิตย์และตัวเร่งปฏิกิริยา: ปฏิกิริยาแยกโมเลกุลน้ำ” [Online] เข้าถึงได้จาก: <http://www.vchakarn.com>. (วันที่สืบค้น 29 กรกฎาคม 2551)
- [8] นคร สิววรรณวงศ์ วรรณ มีคำ และวรัญญา เห็นวัฒนธรรม. 2547. การศึกษาการเตรียมนิกเกิลขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีไมโครอิมัลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.
- [9] ประวิทย์ ดันจงนาวิน. 2540. เคมีแคตะลิสต์. ม.ป.ท.. แผนกเอกสารการพิมพ์.
- [10] แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. (2535). หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ชวนพิมพ์ ISBN 974-340-465-1.

- [11] วิทธีนันท์ ศิริพงษ์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไททาเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [12] 2551. “น้ำ” [Online] เข้าถึงได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki>. (วันที่สืบค้น 9 สิงหาคม 2551)
- [13] 2551. “ไฮโดรเจน” [Online] เข้าถึงได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki>. (วันที่สืบค้น 9 สิงหาคม 2551)
- [14] A. Al – Kahlout. **Coloration mechanisms of sol – gel NiO – TiO₂ layers studied by EQCM.** Leibniz – Institut für Neue Materialien Germany.
- [15] Labourel, Earl. Catal. B: Env, 21 (2) (1997) 193.
- [16] Larry R. Taylor, Richard B. Papp and Bruce D. Pollard. 1994. **Instrumental Methods for Determining Elements.** pp.163-164, 176. VCH Publishers, Inc.,.
- [17] Niltharach, A. 2003. **Metal Oxides as Oxidative Catalysis for Catalytic Oxidation of Volatile Organic Chemical.** Master Degree Inorganic Chemistry, Science, Kasetsart University.
- [18] Tammanoon Sreehawong. n.d. **Quantifying influence of operational parameters on photocatalytic H₂ evolution over Pt-loaded nanocrystalline mesoporous TiO₂ prepared by single step sol – gel process with surfactant template.** Chulalongkorn University.
- [19] Voorhoeve R.J.H. 1997. **Advance Materials in Catalysis.** ed. Burton J. Jand Garten R.L., Eds., Academic Press, New York. pp. 129 – 139
- [20] n.d. “Ceria-3D-ionic.png” [Online] A variable: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image>. (Retrieved December 13, 2007)
- [21] n.d. “CMC (Carboxyl methyl cellulose)” [Online] A variable: <http://www.ttcexpert.com>. (Retrieved December 5, 2007)
- [22] n.d. “Gas Chromatography (GC)” [Online] A variable: <http://www.ligandsci.com>. (Retrieved May 30, 2007)

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณขนาดผลึก

สมการข้างล่างนี้ เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดผลึกของอนุภาค $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ ที่สังเคราะห์ได้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

- เมื่อ
- D คือ ขนาดของอนุภาคในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบที่เกิดจากการกระเจิงของรังสี
 - k คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 - λ คือ ความกว้างของพีคมีค่าเป็นเรเดียน
 - θ คือ มุมระหว่างรังสีเอกซ์กับระนาบที่เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์
 - β คือ ค่าคงที่ มักมีค่าเท่ากับ 1

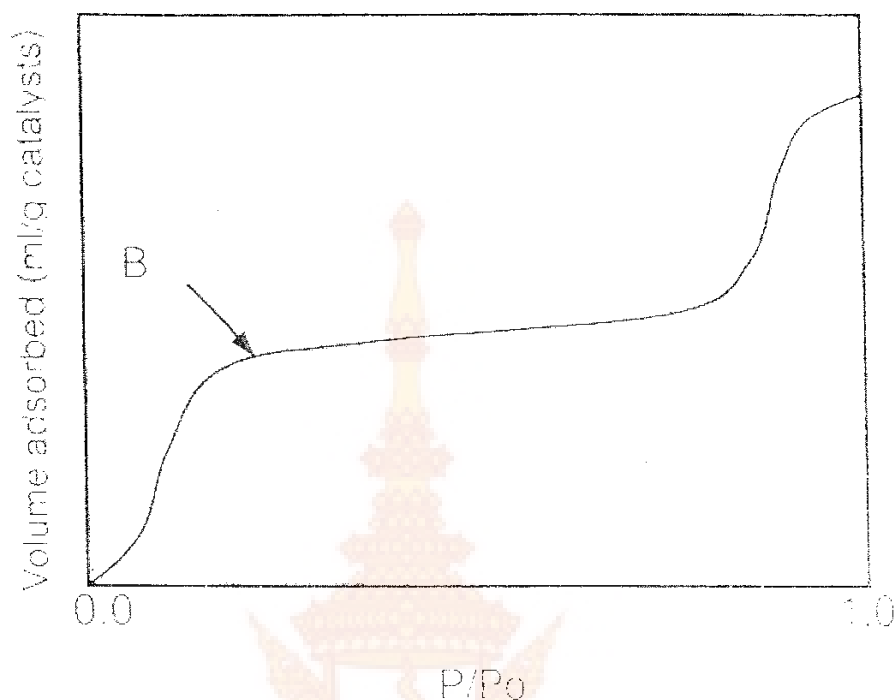
ภาคผนวก ข

การวัดพื้นที่ผิวเฉลี่ยและขนาดรูพรุนของ $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ โดย (Branuer-Emmett-Teller, BET)

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างโดย Branuer-Emmett-Teller ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ ที่สังเคราะห์โดยใช้หลักการดูดซับของสาร

ข.1 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยใช้วิธี (BET) [2]

การวัดพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน และการศึกษารูปร่างของรูพรุนเป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา ๑ เนื่องจากพื้นที่ผิวจะเป็นบริเวณที่ใช้ว่างของลัทธิประกอบกัมมันต์ที่จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาดูดซับของแก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพ หรือวิธีบีอีที (BET ย่อมาจาก Branuer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว (ในที่นี้เป็นอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวหรืออาร์กอนเหลว) ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อให้เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับของแก๊สไนโตรเจน ดังกราฟในรูปที่ ข .1 จะเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเส้นกราฟจะราบแสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นที่ผิวเป็นชั้นเดียว และเมื่อความดันย่อยของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจนเกิดจุดที่เป็นดูดซับแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนเหลวในรูพรุนทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



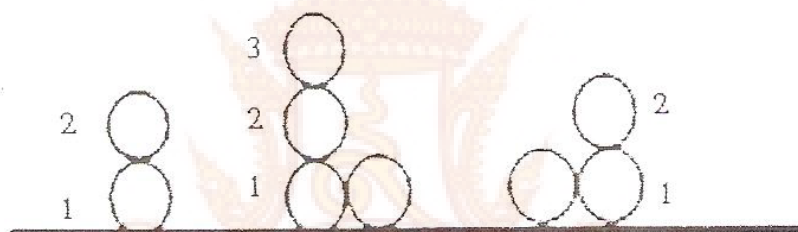
รูปที่ ข.1 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีการดูดซับของแก๊สด้วย Branuer-Emmett-Teller (BET) [2]

ข.2 สมการของ Branuer-Emmett-Teller (BET) [2]

ในปี 1983 Branuer-Emmett-Teller ได้ศึกษากลไกของการดูดซับต่อจาก Langmuir ในส่วนที่เกี่ยวกับการจัดเรียงโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นที่สูงกว่า ทั้งนี้เพราะก่อนหน้านี้เขาได้หลักฐานจากการทดลองที่ยืนยันได้แน่ชัดว่า การดูดซับจะไม่เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวแต่จะมีการดูดซับในชั้นที่สองและชั้นที่สูงกว่าติดตามมาด้วย เสนอตามแนวคิดของ BET ถือว่าเมื่อระบบอยู่ในสมดุลที่ความดันย่อยในแต่ละฐานดูดซับบนพื้นที่ผิวจะมีโมเลกุลของสารถูกดูดซับจำนวนหนึ่งกลั่นตัวอยู่บนฐานดูดซับแต่ละฐานมากน้อยต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.2 และรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.2 แบบจำลองการดูดซับโมเลกุลหลายชั้น [2]



รูปที่ ข.3 The BET model for adsorption [2]

จากข้อสมมติฐานทั้งหมดจะให้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0}$$

ข.1

โดยที่ V คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

V_m คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับเพื่อเกิดเป็นแบบบนเดียว (Monolayer)

P_0 คือ ความดันไออิ่มตัว (Saturation pressure) ของแก๊สที่อุณหภูมิทดลอง

C คือ ค่าคงที่โดยมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของการดูดซับ และค่าความร้อนของการกลายเป็นไอ

$$C = e^{(q_1 - q_L)/RT}$$

ข.2

โดยที่ q_I คือ ความร้อนของการดูดซับของการเกิดขึ้นแรก

q_L คือ ค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของแก๊สที่มาดูดซับบนชั้นอื่นๆทั้งหมด

ถ้า $q_I > q_L$ จะสอดคล้องกับ adsorption isotherm ชนิดที่ 2 แต่ถ้า $q_I < q_L$ จะสอดคล้องกับ adsorption isotherm ชนิดที่ 3

จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $P/V(P_0 - P)$ กับ P/P_0 จะให้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน (slope) เท่ากับ $(C-1)/V_m C$ และสมการจุดตัด (intercept) เท่ากับ $1/V_m C$ จากค่าความชันและจุดตัด สามารถใช้หาค่า V_m และ C ได้ สมการของ BET สามารถใช้ได้กับการดูดซับจำนวนมากที่มีค่า P/P_0 อยู่ระหว่าง 0.05-0.30 และช่วงนี้ปกติจะใช้สำหรับวัดค่าพื้นที่ผิว เมื่อค่า P/P_0 เพิ่มขึ้นจะเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) และ pore condensation ทำให้เส้นกราฟไม่เป็นเส้นตรงที่ได้จากการพล็อตสมการของ BET จะเกิดที่ P/P_0 ต่ำมาก ประมาณ 0.01 หรือ น้อยกว่า

จากสมการ $V_m = 1/(S+I)$ เมื่อ S คือ ค่าความชันซึ่งมีค่าเท่ากับ $(C+1)/V_m C$ และ I คือ จุดตัดที่มีค่าเท่ากับ $1/V_m C$

$$S+1 = \frac{1}{V_m C} [(C-1)+1] = \frac{1}{V_m} \quad \text{ข.3}$$

ค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จาก V_m ถ้ารู้พื้นที่โดยเฉลี่ยของโมเลกุลที่มาดูดซับ Inter vapor ใดๆ ก็ตามที่สามารถควมแน่นได้ สามารถใช้วิธีของ BET แต่เพื่อให้ได้ผลการวัดที่น่าเชื่อถือ โมเลกุลควรจะเล็กและมีลักษณะเป็นทรงกลม จะใช้ในโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็น และใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวถูกดูดซับเนื่องจากมีราคาถูกและมีความบริสุทธิ์ ไนโตรเจนจะให้ลักษณะ adsorption isotherm ชนิดที่ 2 บนผิวหน้าทั้งหมด

ความดันไอย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10-100 kPa เพื่อให้ได้ค่า P/P_0 อยู่ในช่วงประมาณ 0.5-0.3

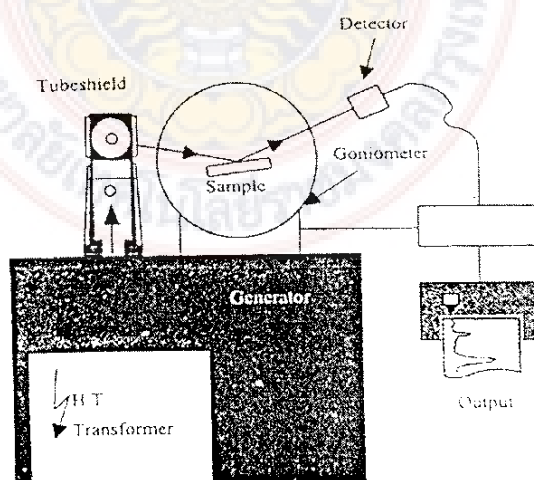
ภาคผนวก ค

การหาโครงสร้างของ $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ โดยเอกซ์ – เรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโทรสโกปี (X – Ray Diffraction Spectroscopy, XRD) [10]

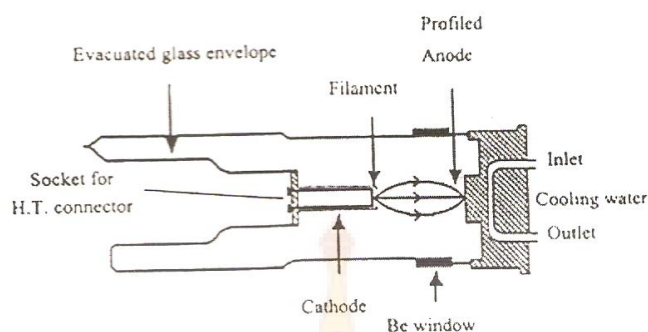
เอกซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันเป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (non-destruction analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์และความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างผลึก

รังสีเอกซ์ (X-Ray) นั้นจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง และมีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 10 นาโนเมตร ซึ่งการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสารนั้นจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น เกิดการเปล่งแสง (emission) การดูดกลืน (adsorption) การกระเจิงแสง (scattering) หรือการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้นซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้ล้วนเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดซึ่งหลักการดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถนำมาใช้วิเคราะห์สารได้ดังนี้คือ

1. ใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมีได้
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ ค.1 หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (Diffraction Spectroscopy, XRD) [10]

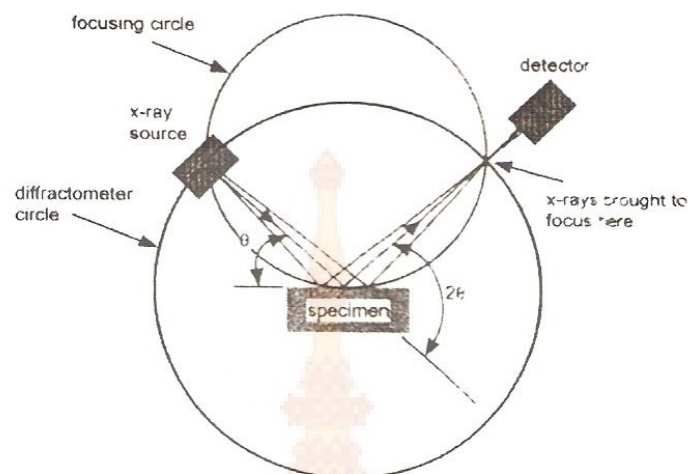


รูปที่ ค.2 ส่วนประกอบของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ [10]

หลักการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันนั้น เริ่มจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high-tension transformer) ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วแคโทดทำให้ไส้หลอดเกิดการร้อนขึ้น อิเล็กตรอนจะไปจับกันหนาแน่นที่บริเวณไส้หลอด ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ที่บริเวณระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดสูง ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปชนเป้า (target) ที่ขั้วแอโนด เกิดการปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งรังสีเอกซ์นี้จะผ่านออกมาทางหน้าต่างที่ทำด้วยเบอริเลียม (Be window) ส่วนของหลอดรังสีเอกซ์นี้มีหลายแบบเรียกชื่อตามชนิดของโลหะที่ใช้ทำขั้วแอโนด เช่น Mo W Cr Cu Co Ag Fe ซึ่งจะให้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์

โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ขั้วแอโนดที่ทำมาจาก Cu ซึ่งให้ค่าความยาวคลื่น 1.542 อังสตรอม หลังจากทีรังสีเอกซ์ได้ผ่านหน้าต่างออกมาแล้วก็จะถูกบีบให้ลำแสงแคบลงโดยใช้ไดเวอร์เจนสลิต ลำของรังสีเอกซ์ที่ผ่านไดเวอร์เจนสลิตจะตกกระทบบนตัวอย่างซึ่งติดไว้กับแกนโกนิโอมิเตอร์ (goniometer) รังสีที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่างจะผ่านไปยังรีซีฟิงสลิตและเข้าไปยังหน่วยรับสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูปดิฟแฟรคโตแกรม (diffractogram) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ ซึ่งเกิดจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์กับค่าความเข้มของรังสี

- Basics



รูปที่ ค.3 ลักษณะของมุมที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดการกระเจิงแสง [10]



ภาคผนวก ง

การศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบการทำงานของเครื่อง และการเตรียมชิ้นงานก่อนทำการวิเคราะห์

ง.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [3]

รูปที่ ง.1 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning-Electron Microscope, SEM) เครื่องมือนี้นั้นประกอบอยู่ในห้องสุญญากาศ โดยหน้าที่ส่วนประกอบแต่ละอันมีรายละเอียดดังนี้

1. เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) โดยทั่วไปใช้ขดลวดทั้งสแตนเลส อิเล็กตรอนที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดคือ อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

2. เลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำหน้าที่บังคับให้ลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดและความเข้มข้นเหมาะสมกับตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดที่สุดที่กำลังขยายที่ต้องการ การลดขนาดของลำอิเล็กตรอนจะช่วยเพิ่มกำลังขยายของกำลังขยาย

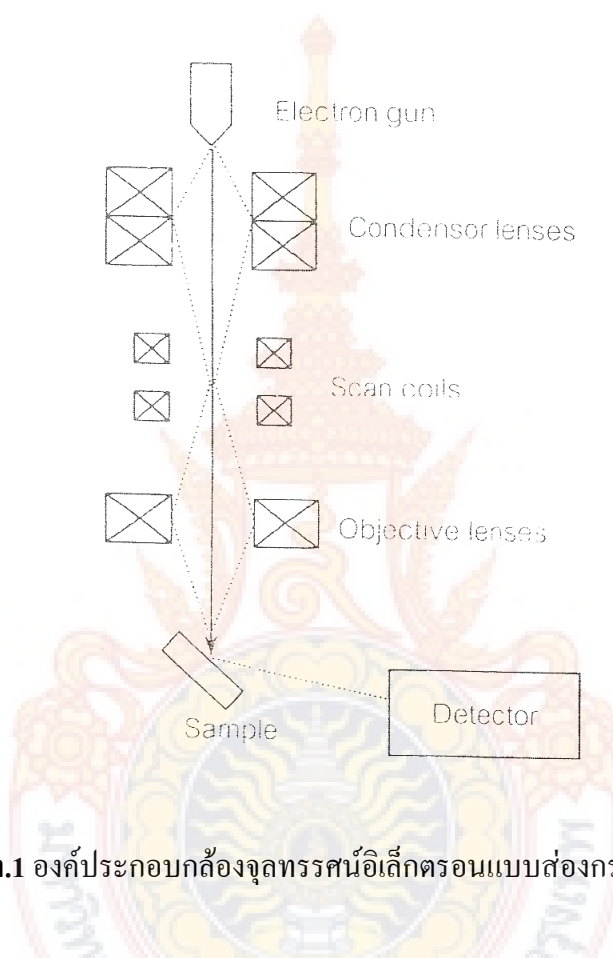
3. ขดลวดสำหรับการส่องกราด (Scanning coil) ทำหน้าที่บังคับให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวนอน และแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่างที่เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

4. เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) เป็นเลนส์อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดภาพขั้นต้น อาศัยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดของภาพได้ โดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

5. ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอน (Detector) ตัวเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยจะเก็บสัญญาณภาพแต่ละจุดจากปลายอิเล็กตรอน ปรากฏเป็นภาพบนจอภาพ

การทำงานของ SEM เริ่มจากการผ่านลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มีขนาดแคบไปบนผิวหน้าตัวอย่าง แล้ววัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิหรืออิเล็กตรอนที่กระเจิงแสงกลับเทียบกับตำแหน่งของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ตำแหน่งของตัวอย่างจะทำให้เกิดคอนแทรสต์ กล่าวคือส่วนของผิวหน้าที่หันไป

ทางตัว ตรวจวัด จะสว่างกว่าส่วนของผิวหน้าซึ่งอยู่ตรงข้ามกับตัวตรวจวัด อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ออกมาจากส่วนของผิวหน้ามักจะมีค่าพลังงานต่ำ (ประมาณ 5-50 eV) อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับจากส่วนที่ลึกจากผิวหน้าจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะผิวหน้าและลักษณะของตัวอย่าง เนื่องจากธาตุหนักจะทำให้เกิดการกระเจิงได้ดีกว่า จึงปรากฏเป็นภาพที่สว่างกว่า



รูปที่ ง.1 องค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [3]

ง.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์และการใช้เครื่อง SEM~ เพื่อให้ได้ภาพที่ดีนั้นนอกจากจะขึ้นกับประสิทธิภาพหรือความสามารถของเครื่องแล้ว ยังขึ้นกับชนิดของตัวอย่างและเทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมด้วย สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมตัวอย่างโดยเครื่อง SEM มีรายละเอียดโดยสังเขป ดังนี้

ง.2.1 ประเภทตัวอย่าง

เป็นวัสดุตัวอย่างหรือผงวัสดุตัวอย่างที่เป็นของแข็งมีความดันต่ำกว่า 1 หรือเท่ากับ 10^{-3} ทอร์

ง.2.2 ขนาด

ขนาดของตัวอย่างถูกจำกัดโดยขนาดของช่องใส่ตัวอย่างและแท่นวางตัวอย่าง ของเครื่อง SEM ซึ่งแตกต่างกันแล้วแต่บริษัทและรุ่นที่ผลิต โดยในบางรุ่นอาจวางตัวอย่างขนาดใหญ่ได้ประมาณ 15 ถึง 30 cm อย่างไรก็ตามขอบเขตของการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนจำกัดอยู่ในวงพื้นที่ไม่เกิน 4 ถึง 8 cm

ง.2.3 การเตรียมตัวอย่าง

ง.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง

กรณีตัวอย่างเป็นชิ้นงาน ก่อนนำเข้าศึกษาในเครื่องต้องทำการตัดชิ้นงานเข้ากับก้านวางตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่ทำด้วยโลหะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมมีก้านที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเหมาะสมใส่ได้พอดีกับช่องว่างในฐาน วางตัวอย่างและใช้สารยึดติดตัวอย่างเข้ากับก้านวางตัวอย่าง วิธีการทำโดยการทาหรือติดสารยึดติดตัวอย่างลงบนแผ่นหน้าของก้านวางตัวอย่างและติดตัวอย่างด้านที่ไม่ต้องการศึกษาลงบนแผ่นหน้าก้านวางตัวอย่าง ทำให้ติดสนิทหรือแห้งดีระยะหนึ่ง ในกรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า ต้องนำตัวอย่างนั้นไปผ่านขั้นตอนการฉาบด้วยโลหะก่อนนำไปศึกษา

กรณีตัวอย่างเป็นผงมักใช้สารยึดติดตัวอย่างจำพวกที่เป็นเทปกาวยสองหน้า ติดด้านบนของก้านวางตัวอย่างและโรยผงตัวอย่างให้กระจายลงบนด้านหน้าของก้านวาง จากนั้นใช้ลมยางเป่าทำการปิดฝุ่นและเศษของผงตัวอย่างที่ไม่ยึดติดบนก้านวาง จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อทำการศึกษาต่อไป หรือทำการฉาบผิวด้วยโลหะ ในกรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า

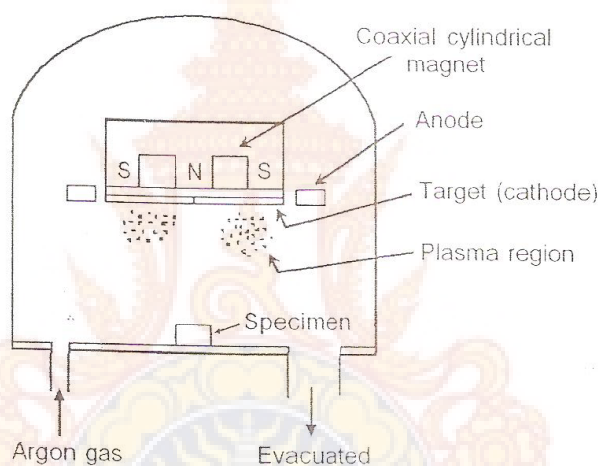
ง.2.3.2 การเคลือบผิวชิ้นงาน (Coating)

ในการเคลือบผิวหรือฉาบชิ้นงานตัวอย่างนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และโลหะผสมทอง -พัลลาเดียม เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับตัวอย่าง ทั้งนี้หลักการเบื้องต้นของการฉาบผิวคือต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพจากแท่นโลหะมาเป็นโมเลกุล และตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะฉาบผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องเป็นตัวอย่างที่นำไฟฟ้าได้ เนื่องจากต้องส่องกราดตัวอย่างด้วยอิเล็กตรอน และต้องทำให้แห้งด้วยการอบไล่ความชื้น เนื่องจากความชื้นในตัวอย่างอาจจะเหຍออกมาเมื่อนำเข้าสู่ระบบสุญญากาศของเครื่อง ถ้าตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องนำมาเคลือบเพื่อให้นำไฟฟ้า ตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น ตัวอย่างชีวภาพ (แมลง พืช เนื้อเยื่อ) ต้องเคลือบเพื่อให้นำไฟฟ้า การเคลือบ

จะช่วยลดการสะสมของประจุ (Charge-up) และเพิ่มปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิได้ดี กล่าวคือมีค่าพลังงานไอออไนเซชันต่ำ และมีจุดหลอมเหลวสูง โดยมักใช้ทองเป็นโลหะเคลือบ เทคนิคที่นิยมใช้ได้แก่ การสปัตเตอร์ (Sputtering) ซึ่งแผนภาพของเครื่องสปัตเตอร์ แสดงไว้ในรูปที่ ๒.2 การสปัตเตอร์ต้องทำในระบบสุญญากาศจึงต้องต่อกับปั๊มสุญญากาศ โดยแทนที่อากาศด้วยแก๊สเฉื่อยและดูดออกหลายๆครั้ง ก่อนทำการสปัตเตอร์โดยให้ทองเป็นแคโทดหรือเป้า ทำให้ผิวหน้าของตัวอย่างถูกเคลือบบางๆ ด้วยทอง ความหนาประมาณ 7.5-3.0 nm

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยการนำตัวอย่างที่เคลือบแล้วเข้าสู่ตัวเครื่องและดูดอากาศออกก่อนที่จะเคลื่อนเข้าไปบนที่วางตัวอย่างซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะยิงอิเล็กตรอนเพื่อทำการวิเคราะห์



รูปที่ ๒.2 ส่วนประกอบของเครื่อง [3]

ภาคผนวก จ

การหาปริมาณแก๊สไฮโดรเจน จากการแยกโมเลกุลของน้ำ โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

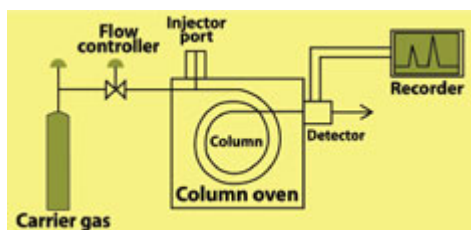
Gas Chromatography (GC) [22]

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นหนึ่งในเทคนิคของการแยกและวิเคราะห์สารโดยเทคนิคนี้ใช้สำหรับการแยกสารผสมที่สามารถทำให้กลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิพอเหมาะ เครื่องมือรุ่นใหม่ๆ ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาทั้งในส่วนของอุปกรณ์และเทคนิคเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ พลังงาน และสิ่งแวดล้อม

เทคนิคโครมาโทกราฟีทุกประเภทจะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน นั่นคือ ทำการแยกองค์ประกอบของสารที่กระจายอยู่ระหว่างเฟสที่ไม่ผสมกันสองเฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (stationary phase) และ เฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) องค์ประกอบของสารตัวอย่างซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างจากเฟสทั้งสองจะเคลื่อนที่ผ่านด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน เมื่อองค์ประกอบของสารเคลื่อนที่ผ่านออกมาจากระบบจะถูกชะแล้วผ่านไปยังเครื่องตรวจวัดซึ่งจะทำการรายงานผลออกมาในรูปแบบของโครมาโตแกรมเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปสิ่งที่ทำให้เทคนิคโครมาโทกราฟีแต่ละเทคนิคมีความแตกต่างกันคือ เฟสเคลื่อนที่ สำหรับแก๊สโครมาโทกราฟีจะมีเฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สนั่นเอง นอกจากการจำแนกประเภทของเทคนิคโครมาโทกราฟี ด้วยเฟสเคลื่อนที่แล้ว เราสามารถใช้เฟส อยู่กับที่ในการแยกย่อยประเภทของแก๊สโครมาโทกราฟีได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. แก๊สโครมาโทกราฟีแบบของแข็ง (Gas-solid chromatography, GSC) โครมาโทกราฟีประเภทนี้จะใช้ของแข็ง เช่น ซิลิกาเจลเป็นเฟสอยู่กับที่ กลไกการแยกสารที่เกิดขึ้นเป็นแบบการดูดซับ ดังนั้นการแยกสารจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดซับของสารที่บรรจุในคอลัมน์ แต่โดยทั่วไปแล้วโครมาโทกราฟีชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก

2. แก๊สโครมาโทกราฟีแบบของเหลว (Gas-liquid chromatography, GLC) โครมาโทกราฟีประเภทนี้จะใช้ของเหลวเป็นเฟสอยู่กับที่ ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบของเหลวให้เป็นชั้นบางๆ บนของแข็งเฉื่อยที่เรียกว่า solid supporter กลไกการแยกสารที่เกิดขึ้น เป็นแบบพาร์ทิชันซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากและให้ผลการทดลองที่ดีกว่า GSC จึงทำให้ GLC เป็นที่นิยมใช้



รูปที่ จ.1 แผนผังแสดงลักษณะของเครื่อง
แก๊สโครมาโทกราฟี [22]



รูปที่ จ.2 ชนิดต่างๆของคอลัมน์[22]

จ.1 เครื่องมือ

ลักษณะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยทั่วไป จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ 4 ส่วน ดังนี้

1. **Gas supply unit** แก๊สที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่จะต้องเป็นแก๊สเฉื่อย โดยปกติแล้วจะใช้ ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการเลือกชนิดของแก๊สจะขึ้นกับชนิดของ เครื่องตรวจวัด เฟสเคลื่อนที่นี้จะถูกนำเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีผ่านทางตัวควบคุมอัตราการ ไหลเพื่อรักษาให้มีอัตราการไหลคงที่ถ้าอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียง 1 เปอร์เซ็นต์จะทำให้เวลาในการหน่วงเหนี่ยวเปลี่ยนไป 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ จะต้องทำการควบคุมอัตราการไหลให้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 0.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นเรื่องยากในการควบคุมเพราะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำโปรแกรมอุณหภูมิก็จะส่งผลต่อการ เปลี่ยนแปลงความหนืดและอัตราการไหลของแก๊ส ดังนั้นเครื่องมือในรุ่นใหม่ๆ จึงมีระบบไมโคร โปร- เซสเซอร์ในการควบคุมอัตราการไหลเพื่อแก้ไขปัญหานี้

2. **Sampling unit** หลังจากที่เปิดให้แก๊สพาหะผ่านเข้าสู่ส่วนต่างๆ ของเครื่องมือแล้ว สาร ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกฉีดผ่านมาทางส่วนของ Sampling unit ที่ประกอบด้วยเครื่องฉีดสาร และดูดซับ ซึ่งในส่วนนี้สารตัวอย่างจะถูกทำให้ระเหยกลายเป็นไอแล้วส่งผ่านเข้าสู่คอลัมน์เพื่อทำการ แยกองค์ประกอบต่างๆ การใช้เครื่องฉีดสารแต่ละชนิดจะขึ้นกับสถานะของตัวอย่างและชนิดของ คอลัมน์แต่วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการใช้เข็มฉีดสารตัวอย่างผ่านทาง septum ไปยังส่วนที่ทำให้สาร ระเหยกลายเป็นไอซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารประมาณ 50 องศาเซลเซียส สำหรับแก๊ส คอลัมน์สารตัวอย่างที่ฉีดจะต้องมีปริมาณ 10-20 ไมโครลิตร ในขณะที่แก๊สคอลัมน์จะใช้ตัวอย่าง เพียง 3-10 ไมโครลิตร โดยใช้ตัว splitter สำหรับเครื่องมือในปัจจุบันจะมีระบบฉีดสารแบบอัตโนมัติ มีระบบที่คอยควบคุมอุณหภูมิของดูดซับเพื่อให้วิเคราะห์ได้เร็วขึ้นสามารถทำความสะอาดคอลัมน์ ปรับปรุงประสิทธิภาพของการแยกสามารถเลือกการระเหยสำหรับการฉีดสารเข้าสู่คอลัมน์โดยตรง จากส่วนบนของคอลัมน์และสามารถลดปัญหาการสลายตัวของสารที่ไม่เสถียรได้

3. **Column unit** คอลัมน์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในการแยกสาร โดยทั่วไปแล้ว คอลัมน์สำหรับแก๊สโครมาโทกราฟี มี 2 ประเภทคือ แพ็คคอลัมน์ และแคปิลารีคอลัมน์ แพ็คคอลัมน์ จะมี solid support ซึ่งโดยส่วนใหญ่คือ diatomaceous earth เป็นตัวยึดเฟสอยู่กับที่ มีความยาว 1.5-10 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2-4 มิลลิเมตร ในขณะที่แคปิลารีคอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในน้อยกว่าระดับมิลลิเมตรถึง 10 เท่า และสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ wall-coated open-tubular (WCOT) ซึ่งผนังภายในถูกเคลือบไว้ด้วยเฟสอยู่กับที่ที่เป็นของเหลว และ support-coated open tubular (SCOT) ซึ่งผนังภายในถูกเคลือบไว้ด้วยสาร เช่น diatomaceous earth เป็นชั้นบางๆ เพื่อ ดูดซับเฟสอยู่กับที่โดยทั่วไปแล้ว SCOT จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่า WCOT แต่อย่างไรก็ตามทั้งคู่ก็มี ประสิทธิภาพที่ดีกว่าแพ็คคอลัมน์นอกจากคอลัมน์แล้วในส่วนนี้ยังต้องมีคู่มือที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ คอลัมน์ อุณหภูมิของคอลัมน์จะต้องถูกควบคุมไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10 องศาเซลเซียส ซึ่ง โดยทั่วไปอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆและมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของตัวอย่างในช่วง 2-30 นาทีในช่วง ของการชะสาร อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้การแยกที่ดีแต่จะทำให้เวลาในการชะสารเพิ่มขึ้น และถ้าตัวอย่างมี ช่วงของการเดือดที่กว้างจะต้องอาศัยการทำโปรแกรมอุณหภูมิเข้าช่วย

4. **Detector unit** เครื่องตรวจวัดเป็นอุปกรณ์ชิ้นสุดท้ายของแก๊สโครมาโทกราฟี ทำหน้าที่ ในการตรวจวัดสารที่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์แล้วส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังระบบประมวลผลซึ่งใน ปัจจุบันจะใช้ระบบการควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะให้รายละเอียดของโครมาโตแกรม ข้อมูล ของพิก (พื้นที่ ความสูง ความกว้างเป็นต้น) การสอบเทียบ การคำนวณ การรายงานผล และสถิติ เครื่องตรวจวัดมีหลายประเภท แต่ละประเภทมีลักษณะเฉพาะตัวแปรในการทำงาน และประสิทธิภาพ ที่แตกต่างกันออกไป ในตารางที่ จ. 1 แสดงเครื่องตรวจวัดต่างๆ ไปที่ใช้ในเครื่องมือแก๊สโครมาโท กราฟีเครื่องตรวจวัดและท่อที่เชื่อมระหว่างคอลัมน์กับเครื่องตรวจวัดจะต้องรักษาอุณหภูมิให้สูงกว่า อุณหภูมิของคู่อบไม่เกิน 15 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเกิดการควบแน่นตรง บริเวณท่อหรือเครื่องตรวจวัดซึ่งจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนและลดประสิทธิภาพในการ ตอบสนองของเครื่องตรวจวัดได้

จ.2 ข้อดี-ข้อจำกัด

ข้อดี

แก๊สโครมาโทกราฟีให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงความหลากหลายในการเลือกใช้ เฟสอยู่กับที่ที่ทำให้มีคุณสมบัติการหน่วงเหนี่ยวสารที่แตกต่างกันส่งผลให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ งานได้เป็นจำนวนมาก เครื่องตรวจวัดที่ใช้ในแก๊สโครมาโทกราฟีมีความไวสูง สามารถตรวจวัด สารประกอบได้อย่างถูกต้อง แม่นยำเนื่องจากเฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สจึงสามารถต่อเข้ากับ

mass spectrometer ทำให้แก๊สโครมาโทกราฟีกลายเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้แก๊สโครมาโทกราฟียังสามารถใช้ในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ปนเปื้อนได้หลายชนิดอีกด้วย

ตารางที่ จ.1 เครื่องตรวจวัดทั่วไปที่ใช้ในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี [22]

เครื่องตรวจวัด	ประเภท	Support gases	การเลือกจำเพาะ	ความสามารถในการตรวจวัด	Dynamic range
Flam Ionization (FID)	Mass flow	ไฮโดรเจนและอากาศ	สารประกอบอินทรีย์โดยส่วนใหญ่	100 pg	10 ⁷
Thermal Conductivity (TCD)	ความเข้มข้น	สารมาตรฐาน	ใช้งานได้ทั่วไป	1 ng	10 ⁷
Electron Capture (ECD)	ความเข้มข้น	Make-up	แฮไลด์ ในเตรต ไนโตร เปอร์ออกไซด์ แอนไฮไดรด์ โลหะอินทรีย์	50 fg	10 ⁵
Nitrogen-Phosphorus	Mass flow	ไฮโดรเจนและอากาศ	ไนเตรต ฟอสฟอรัส	10 pg	10 ⁶
Flame Photometric (FPD)	Mass flow	ไฮโดรเจน อากาศ ออกซิเจน	กำมะถัน ฟอสฟอรัส ดีบุก โบรอน อาร์เซนิก เจอร์มา- เนียม เซเลเนียม โครเมียม	100 pg	10 ³
Photo Ionization (PID)	ความเข้มข้น	Make-up	อะลิฟาติกส์ อะโรมาติกส์ คีโตน เอสเทอร์ แอลดีไฮด์ เอมีน เฮเทอโรไซคลิก organosulphurs และ โลหะ อินทรีย์ บางประเภท	2 pg	10 ⁷

ข้อจำกัด

สารตัวอย่างต้องเป็นสารที่ระเหยง่ายเมื่อฉีดเข้าไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ต้องมีความเสถียร ไม่เกิดการสลายตัวเมื่อถึงอุณหภูมิที่ทำการระเหย นอกจากนี้แก๊สโครมาโทกราฟียังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์สารโมเลกุลไม่มีขั้วหรือสารสารที่มีความเป็นขั้วเพียงเล็กน้อย สามารถแยกแยะโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้เพียง 20 เปอร์เซนต์แต่สามารถทำให้วิเคราะห์สารต่างๆ ได้เพิ่มขึ้นด้วยการทำอนุพันธ์เทคโนโลยีในปัจจุบันปัจจุบันเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีได้รับการพัฒนาทุกๆ ส่วนขององค์ประกอบ รวมไปถึงการพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน การวิเคราะห์ และการรายงานผลของเครื่องมือ ในที่นี้ผู้เขียนจะแนะนำเทคโนโลยีของเครื่องมือที่มีการใช้งานกันในปัจจุบัน โดยจะแบ่งแยกตามส่วนประกอบของเครื่องมือที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อของเครื่องมือ



รูปที่ จ.3 อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมระบบความเร็วของการไหลของแก๊สใน Agilent 6890N network [22]



รูปที่ จ.4 อุณหภูมิภายในตู้บอดี้ของ Young Lin Instrument [22]

1. เทคโนโลยีในส่วนของ Gas supply unit

ผู้ผลิตแต่ละรายต่างก็มีการพัฒนาในส่วนของการควบคุมแก๊สที่มีลักษณะเฉพาะตัว ที่ต่างกันไป ระบบ Advance Pneumatic Control (APC) ที่มีในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของ Young Lin Instrument รุ่น Acme 6000 GC หรือ Electronic Pneumatic Control (EPC) ในรุ่น Agilent 6890N network GC ของ Agilent Technologies เป็นระบบที่ควบคุมความดันและการไหลของแก๊สด้วยวาล์วและเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถควบคุมการไหลของสารด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำให้การไหลมีความเสถียรได้รวดเร็วขึ้นและส่งผลให้เครื่องตรวจวัดมีความเสถียรมากขึ้น โปรแกรมควบคุมความดันที่ใช้ในระบบนี้จะช่วยลดการสลายตัวและการสูญเสียสารในการฉีดสารแบบ splitless ระยะเวลาของการหน่วงเหนี่ยวสารลดลงเพราะอุณหภูมิลดลง ระบบได้รับการออกแบบให้สามารถตั้งค่าต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและง่ายโดยการตั้งค่าเพียงครั้งเดียวก็สามารถให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำซึ่งช่วยลดปริมาณการทดสอบซ้ำ นอกจากนี้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของ Agilent Technologies ยังมีเทคโนโลยีที่เรียกว่า Automatically Pressure-mode Selection ซึ่งจะทำให้การเลือก

รูปแบบของความดันให้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ ได้อย่างอัตโนมัติ โดยจะเลือกรูปแบบเป็น Forward-pressure control ในกรณีการฉีดสารแบบ splitless ซึ่งจะช่วยให้ฉีดสารได้มากขึ้น ลดการสลายตัวและสูญเสียตัวอย่าง ส่วนการฉีดสารแบบ split ระบบจะเลือกการควบคุมความดันแบบ Back-pressure control ซึ่งจะช่วยลดการเตรียมตัวอย่างและช่วยให้ระบบมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น

2. เทคโนโลยีในส่วนของ Sampling unit และ Column unit

ด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ ของเครื่องฉีดสาร ทำให้การฉีดสารตัวอย่างเป็นไปอย่างอัตโนมัติ มีความแม่นยำสูง เครื่องฉีดสารของ Young Lin Instrument ได้รับการออกแบบให้สามารถแบ่งความเร็วในการฉีดสารได้ โดยจะฉีดเร็วก็ต่อเมื่อต้องการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของตัวอย่าง และจะปรับให้ฉีดช้าลงเมื่อสารตัวอย่าง ที่วิเคราะห์มีความหนืดสูง สำหรับเครื่องฉีดสารที่ใช้ในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของ Agilent Technologies มีการใช้โปรแกรมในการควบคุม การระเหยกลายเป็นไอของสารตัวอย่าง ซึ่งโปรแกรมนี้อาจช่วยให้สามารถฉีดสารได้เพิ่มมากขึ้นประมาณ 10 เท่า ทำให้เครื่องมีความไวต่อปริมาณเพิ่มมากขึ้น เหมาะสำหรับการนำไปตรวจวัดการแยกมวลหรือการกระจายตัวของอะตอมด้วยเทคโนโลยี Electronic Flow Control (EFC) ของ VARIAN CP-3800 GC ทำให้เครื่องฉีดสารมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการควบคุมความดันและอัตราการไหลของสารด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณในการฉีดสารเพื่อให้มีความไวเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณของแก๊สพาหะโดยการลดอัตราการไหลในระหว่างการฉีดสารด้วยคอลัมน์เป็นส่วนที่มีความสำคัญมาก อุณหภูมิของผู้จะต้องทำการควบคุมอย่างแม่นยำและรวดเร็วเพื่อให้ได้ผล การวิเคราะห์ที่ถูกต้อง Young Lin Instrument จึงได้มีการนำพัดลมและเครื่องทำความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงมาติดตั้งในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในระยะเวลาที่รวดเร็วและมีความเสถียร โดยอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในตู้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 0.1 องศาเซลเซียส เพราะถ้าอุณหภูมิภายในตู้ไม่มีความเสถียรจะทำให้เวลาในการหน่วงเหนี่ยวสารมีการเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้เทคโนโลยี Micro-fluidic ของ Agilent Technologies ได้ออกแบบปริมาตรภายในของตู้ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้เครื่องมือมีประสิทธิภาพในการแยกมากที่สุดและกำจัดการเกิดหางของพีค สามารถติดตั้งคอลัมน์ได้ง่าย และป้องกันรอยรั่วของผู้ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส

3. เทคโนโลยีในส่วนของ Detector unit Micro-Electron Capture Detector

เป็นเครื่องตรวจวัดแบบใหม่ของ Agilent Technologies ที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีขึ้น ลดการทดสอบซ้ำ มีขีดจำกัดการตรวจวัดที่ดีขึ้น มีความไวสูง เมื่อเทียบกับ ECD แบบเดิมๆ โดยไม่จำเป็นต้องทำการละลายสารตัวอย่างให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงการทดสอบ Pulsed Discharge Detector (PDD) ก็เป็นเครื่องตรวจวัดอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาจาก Young Lin Instrument

ซึ่ง PDD สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ PDECD และ PDHID โดย PDECD จะเลือกตรวจวัดสารประกอบที่มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้สูงเช่น ฟรีออน สารฆ่าแมลงกลุ่ม chlorinated และสารประกอบฮาโลเจนชนิดต่างๆ ซึ่งจะสามารถตรวจวัดปริมาณสารเหล่านี้ได้ต่ำสุด (minimum detectable quantity, MDQ) ในระดับ femtogram (10-15 g) หรือ picogram (10-12 g) เครื่องตรวจวัดประเภทนี้จะมีคุณสมบัติความไวและการตอบสนองเช่นเดียวกับ ECD และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส สำหรับ PDHID เป็นเครื่องตรวจวัดที่มีความไวสูง ไม่ทำลายตัวอย่าง และสามารถใช้งานได้ทั่วไป ตอบสนองทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยมี MDQ ต่ำในระดับ ppb นอกจากการพัฒนาองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องมือแล้วยังมีการนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมเครื่องมือ ทั้งในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งานอย่างครอบคลุม มีประสิทธิภาพสูง รวมถึงการนำเทคโนโลยี Ethernet ซึ่งถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมาตรฐานสำหรับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่นใหม่ๆ เข้ามาช่วยในการควบคุมเครื่องมือวิเคราะห์ รายงานผล ผ่านทางคอมพิวเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อเครือข่ายเข้าด้วยกัน ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถพบในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีของผู้ผลิตแทบทุกราย ไม่ว่าจะเป็น Young Lin Instrument, VARIAN, Agilent Technologies, SHIMADZU, PerkinElmer และผู้ผลิตรายอื่นๆ

จ.3 การประยุกต์ใช้งาน

1. การวิเคราะห์มลพิษทางอากาศ

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกสารที่เป็นมลพิษทางอากาศ เช่น lead alkyls, hydrocarbon, PAN, CO, aldehyde, keton, SO₂, H₂S และออกไซด์บางชนิดของไนโตรเจน เป็นต้น ซึ่งในการวิเคราะห์สารแต่ละชนิดจะใช้เครื่องตรวจวัดที่แตกต่างกันออกไป

2. การวิเคราะห์ทางด้านคลินิก

โดยทั่วไปแล้วงานทางด้านคลินิกมักเป็นงานที่มีปริมาณหรือจำนวนตัวอย่างมาก การวิเคราะห์และแยกโดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟีนั้นสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว ตัวอย่างของสารที่แยกและวิเคราะห์โดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี ได้แก่ กรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรตคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน กรดไขมัน สารอนุพันธ์ ไตรกลีเซอไรด์สเตอรอยด์ บาร์บิทูเรต และวิตามินซี

3. การวิเคราะห์วัสดุสารเคลือบ

วัสดุสารเคลือบมีมากมายหลายชนิด เช่น ยาง เรซินสังเคราะห์ เป็นต้นที่สามารถนำมาวิเคราะห์และแยกได้โดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี

4. การวิเคราะห์สารพวกน้ำมันหอมระเหย

การวิเคราะห์สารประเภทนี้สามารถทำได้หลายเทคนิคแต่แก๊สโครมาโทกราฟีให้ผลที่ดี สะดวกและรวดเร็ว ตัวอย่างของสารที่วิเคราะห์ได้โดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี ได้แก่ น้ำมันจาก สะระแหน่น้ำมันจากมะนาว น้ำมันมะกอก เป็นต้น

5. การวิเคราะห์อาหาร

โดยปกติแล้วในการวิเคราะห์อาหารมักจะใช้ TLC ร่วมกับแก๊สโครมาโทกราฟีเสมอ โดยเฉพาะการวิเคราะห์สารจำพวกสารต้านอนุมูลอิสระและสาร preservative นอกจากนี้ยังใช้ในการ วิเคราะห์สารปนเปื้อน การสลายตัวของสาร ในอาหารและเครื่องดื่ม

6. การวิเคราะห์ยาฆ่าแมลง

การวิเคราะห์และแยกสารพวกยาฆ่าแมลงนิยมใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีเพราะให้ผล การวิเคราะห์ที่ดี มีความถูกต้องสูง โดยเฉพาะยาฆ่าแมลงที่มีสารประกอบพวก halogenated, chlorinated และ organophosphate เป็นส่วนประกอบ

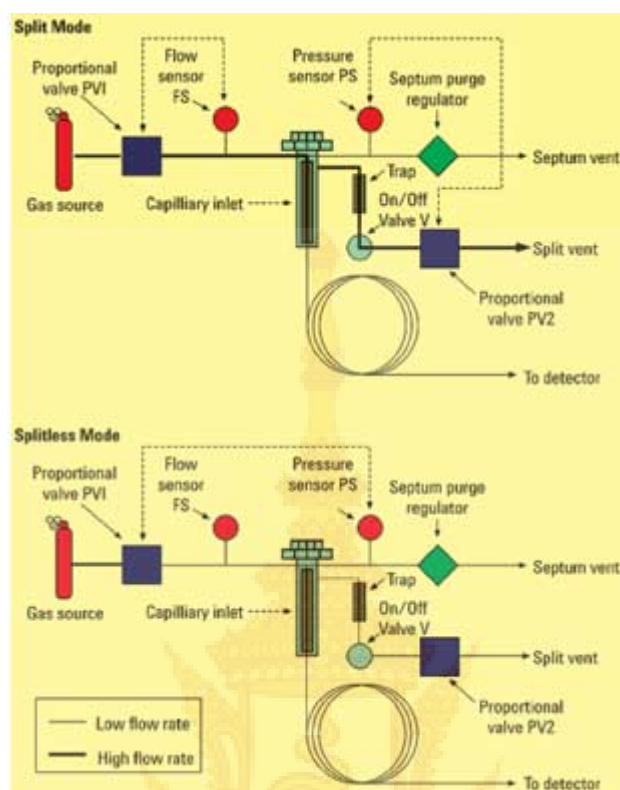
7. การวิเคราะห์สารปิโตรเลียม

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเครื่องมือการแยกและวิเคราะห์ปริมาณส่วนผสมของแก๊ส ธรรมชาติที่ใช้กันอย่างกว้างขวางผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ พวก ไฮโดรคาร์บอน น้ำมันดิบ พอลิไซคลิก โครมาติก เป็นต้น

8. การวิเคราะห์ยา

ปัจจุบันมีการใช้แก๊สโครมาโทกราฟีในการวิเคราะห์สารประกอบต่างๆ ทางด้านการผลิต ยาเนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบพวก alkaloids ชนิดต่างๆ

แก๊สโครมาโทกราฟีมีการนำไปใช้งานหลากหลายประเภทดังที่กล่าวมาในข้างต้น เครื่องมือ จึงได้ถูกพัฒนาเพื่อให้มีความสามารถในการตรวจวัดสารต่างๆ เหล่านี้ ดังนั้น การเลือกชนิดของ เครื่องมือจึงจำเป็นที่จะต้องดูถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน บทความข้างต้น เป็นหนึ่งในแนวทางที่จะทำให้ผู้อ่านเลือกเครื่องมือให้ตรงกับความต้องการใช้งานของตนเอง



รูปที่ จ.5 เทคโนโลยี Automatically Pressure-mode Selection [22]

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ นายชัชวาลย์ สุขมั่น
Mr. Chatchawan Sookman
- หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 73020 06040 21
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 5
- หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ email
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
โทรศัพท์ 0 2286 3991 – 5 ต่อ 9734, 1210, 1201 โทรสาร 0 2286 3991 – 5 ต่อ 9734
e-mail : csookman@yahoo.com

5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการ ศึกษา	ระดับ ปริญญา	อักษรย่อ ปริญญา และชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2543	โท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตร- มหาบัณฑิต	วิศวกรรม เคมี	วิศวกรรม เคมี	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี พระจอมเกล้า ธนบุรี	ไทย
2540	ตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต	เคมี	เคมี	มหาวิทยาลัย นเรศวร	ไทย

- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษแตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
การสังเคราะห์เยื่อแผ่นเซรามิก เทคโนโลยีเยื่อแผ่น การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศโดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

-

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย: ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยเปลือกไข่ในฟลูอิดไคซ์เบดแบบทอสองชั้น

หัวหน้าโครงการวิจัย: ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยเปลือกหอยในฟลูอิดไคซ์เบดแบบทอสองชั้น

หัวหน้าโครงการวิจัย: กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

ผลงานวิจัย

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจลเพื่อเคลือบบนเยื่อแผ่นอะลูมินาสำหรับสังเคราะห์สารประกอบโอเลฟิน (Synthesis of metal oxide catalysts by sol-gel method coated on alumina membrane for olefin synthesis) งบประมาณผลประโยชน์ ปี 2548

วารสารนานาชาติ (International journal)

C. Sookman and P. Kongkachuichay, "Effect of Base Type on Properties of NiO Synthesized by Sol-Gel Method", Adv. In Tech. of Mat. And Mat. Proc. J., **8[1]** (2006) 73-76.

การสัมมนาระดับภูมิภาคและนานาชาติ (International®ion conference)

The Influence of Base Type on the Characterization of a Nickel Oxide Catalyst Formed by a Sol-Gel Technique, *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in mechanical & Materials Engineering*, 30-31 May 2005, Malaysia.

The Effect of Calcined Temperature on the Property of Nickel Oxide Catalyst Synthesized by Sol-Gel Method, *Proceeding of the 3rd EMSES International Symposium on Eco-Energy and Material Science and Engineering*, 6-9 April 2005, Chiang-Mai.

Non-Hydrothermal Synthesis Mesoporous Silica from Rice Husk Ash, *International conference on recent Advances in Mechanical & Material Engineering*, 30-31 May 2005, Kuala Lumpur, Malaysia.

Synthesis of Mesoporous Silica from Rice Husk Ask, *3rd International Conference on Materials for Advance Technology*, 3-8 July 2005, Singapore.

Synthesis of Nanoporous Silica from Natural Resources, *The 3rd Workshop on Regional Network Formation for Enhancing Research and Education*, 7-10 August 2005, Penang, Malaysia.

Samart C., W. Srichaisirivech and C. Sookman (2007) *Nanoporous Silica and Its Application in Drug Delivery*. The 1st Thailand nanotechnology conference. 14-16 August, Chiang Mai, Thailand.

Sookman C. and Samart C.(2007) *Increasing Surface Area of Synthesized Titania Particle Using CMC*. German-Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology. 27-28 September, Chonburi, Thailand.

Samart C.and C. Sookman (2008) *Enhanced Surface Area of Titanium Dioxide Nanoparticle by Carboxy Methyl Cellulose*. The 2nd Progress in Advanced Materials: Micro/Nano Materials and Applications 16-18 January, Konkhean, Thailand

Samart C.and C. Sookman (2008) *Catalytic activity of modified titanium dioxide in water splitting reaction*. The 8th International Symposium on“Global Renaissance by Green Energy Revolution” 22-23 Jan, Nagaoka, Japan

Sritongkittikul P., C. Samart and C. Sookman (2008) *Heterogeneous catalysis of transesterification of soybean oil by KI supported on mesoporous silica*. The 8th International Symposium on“Global Renaissance by Green Energy Revolution” 22-23 Jan, Nagaoka, Japan

Samart C. and C. Sokman (2008) *Synthesis of mesoporous silica for control releasing application*. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2008) 30 Jan-1Feb, Bangkok, Thailand

Samart C. and C. Sokman (2008) *Effect of silica sources in nanoporous silica synthesis on releasing behavior of indigo carmine*. The 2nd Thailand Nanotechnology Conference 2008 13-15 Aug, Phuket, Thailand

การสัมมนาในระดับท้องถิ่น (Local Conference)

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไวน์สระระแห่น. 2548 รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 21. ระหว่างวันที่ 28-30 มีนาคม 2548 ณ โรงแรมเชียงใหม่ภูคำ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ งบประมาณประจำปี 2547 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียด้วยเปลือกหอยในฟลูอิดไดซ์เบดแบบทอสองชั้น. 2547 รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 20. ระหว่างวันที่ 11-13 กุมภาพันธ์ 2547 ณ โรงแรมอมรินทร์ลาคู อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก งบประมาณประจำปี 2546 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการสะเทินน้ำเสียด้วยเปลือกไข่ในฟลูอิดไดซ์เบดแบบทอสองชั้น. 2546 รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 19. ณ ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คลองหก จังหวัดปทุมธานี งบประมาณประจำปี 2545 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

Modification of Crude Palm Oil Diesel Engine Fuel, 29th Congress on Science and Technology of Thailand, 2546, Thailand.

รางวัลที่เคยได้รับ (Received award)

Award for Excellent Poster Presentation at The 3rd workshop on Regional Network Formation for Enhancing Research and Education Penang, Malaysia

The 3rd award for poster competition in The 1st Thailand nanotechnology conference 2007. 14-16 August, Chiang Mai, Thailand.

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัย ว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้วประมาณร้อยละเท่าใด

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณประจำปี 2550-งบแผ่นดิน เริ่มตั้งแต่ตุลาคม 2549 การวิจัยลุล่วงแล้ว 90%

การพัฒนาเทคนิคการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณประจำปี 2551-งบแผ่นดิน เริ่มตั้งแต่ตุลาคม 2550 การวิจัยลุล่วงไปแล้ว 90%

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ชื่อ นายชนาธิป สามารถ
Mr. Chanatip Samart
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 20070 00082 52
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และmail
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

โทรศัพท์ 0 25644440-59 โทรสาร 0 25644483

e-mail : chanatip@tu.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการ ศึกษา	ระดับ ปริญญา	อักษรย่อ ปริญญา และชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2549	เอก	วศ.ค. วิศวกรรมศาสตร- ดุษฎีบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรม เคมี	มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์	ไทย
2546	โท	วศ.ม. วิศวกรรมศาสตร- มหาบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรม เคมี	มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์	ไทย
2543	ตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต	เคมีอุตสาหกรรม	-	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง	ไทย

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ(แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
การเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ ไพโรไลซิส วัสดุที่มีรูพรุน

7. ประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศโดยระบุ
สถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัย
ในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย

-

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

-

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน
(อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

ผลงานวิจัย

-

วารสารนานาชาติ (International journal)

-

วารสารในประเทศ (Local journal)

Samart C. and A. Duangchan (2006) Application of Experimental Design Method for
Copyrolysis of PVC and Cattle Manure. *KMITL Science Journal* 6: 471-478

การสัมมนาระดับภูมิภาคและนานาชาติ (International®ion conference)

Samart C. and A. Duangchan (2002) Pyrolysis of polyvinyl chloride using Ni/Mo and
acid catalysts. *Proceeding of The 12th National Chemical Engineering and Applied
Chemistry*. Bangkok, Thailand, Publish in English, on CD.

Samart C. and A. Duangchan (2003) Upgrading of pyrolyzed oil derived from pyrolysis
of polyvinyl chloride and polypropylene. *Macro Review special issue of Proceeding of the
Asia- Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies*, Mie,
Japan.

Samart C. and A. Duangchan (2004) In situ removal of HCl in copyrolysis process of
fertilizer/ cattle manure and polyvinyl chloride. *The joint international conference on
“Sustainable Energy and Environment (SEE)”* 1-3 December, Huahin, Thailand.

Samart C. and A. Duangchan (2005) Fuel oil production from copyrolysis of PVC with cattle manure. *The 3rd Eco-Energy and Materials Science and Engineering*. 6- 9 April, Chiang-Mai, Thailand.

Samart C. and A. Duangchan (2005) Co- pyrolysis of polyvinyl chloride and fertilizer from manure to fuel oil. *The Asia- Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies*. 9- 11 May, Wellington, New Zealand.

Samart C., A. Cherngvanich and C Sookman (2005) Non- hydrothermal synthesis mesoporous silica from rice husk ash. *International Conference on Recent Advances in Mechanical & Material Engineering*. 30-31 May, Kualalumpur, Malaysia.

Samart C., A. Cherngvanich and C Sookman (2005) Synthesis of mesoporous silica from rice husk ash. *3rd international conference on materials for advance technology*. 3-8 July, Singapore.

Samart C. and A. Duangchan (2005) Copyrolysis of PVC with cattle manure to fuel oil. *The 3rd workshop on regional network formation for enhancing research and education*. 7-10 August, Penang, Malaysia

Samart C. and C. Sookman (2005) Synthesis of Nanoporous Silica from Natural Resources. *The 3rd workshop on regional network formation for enhancing research and education*. 7-10 August, Penang, Malaysia

Samart C. and A. Duangchan (2006) Application of Experimental Design Method for Copyrolysis of PVC and Cattle Manure. *KMITL International Conference on Science and Applied Science 2006*. 8-10 March, Bangkok, Thailand.

Samart C. and A. Duangchan (2006) Investigation of Kinetic Parameters of Copyrolysis of PVC and Cattle Manure. *International Conference on Modeling in Chemical and Biological Engineering Sciences*. 25-27 October, Bangkok, Thailand.

Samart C., W. Srichaisirivech and C. Sookman (2007) *Nanoporous Silica and Its Application in Drug Delivery*. The 1st Thailand nanotechnology conference. 14-16 August, Chiang Mai, Thailand.

Sookman C. and Samart C.(2007) *Increasing Surface Area of Synthesized Titania Particle Using CMC*. German-Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology. 27-28 September, Chonburi, Thailand.

Samart C. and A. Duangchan (2007) *Effect of Silica Alumina:ZnO Ratios of Composite Catalyst on Upgrading Oil Derived from Copyrolysis of Mixed Plastics and Cattle Manure*. The 6th Asia- Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies. 6-11 May, Bangkok, Thailand.

Samart C., W. Srichaisirivech and C. Sookman (2007) *Nanoporous Silica and Its Application in Drug Delivery*. The 1st Thailand nanotechnology conference. 14-16 August, Chiang Mai, Thailand.

Samart C., S. Anantawarasakul and A. Duangchan (2007) *Thermogravimetric Study of PVC and Cattle Manure Mixtures*. The 17th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Annual Conference. 28-29 October, Chiang Mai, Thailand

Samart C. and C. Sookman (2008) *Enhanced Surface Area of Titanium Dioxide Nanoparticle by Carboxy Methyl Cellulose*. The 2nd Progress in Advanced Materials: Micro/Nano Materials and Applications 16-18 January, Konkhean, Thailand

Samart C. and C. Sookman (2008) *Catalytic activity of modified titanium dioxide in water splitting reaction*. The 8th International Symposium on "Global Renaissance by Green Energy Revolution" 22-23 Jan, Nagaoka, Japan

Sritongkittikul P., C. Samart and C. Sookman (2008) *Heterogeneous catalysis of transesterification of soybean oil by KI supported on mesoporous silica*. The 8th International Symposium on "Global Renaissance by Green Energy Revolution" 22-23 Jan, Nagaoka, Japan

Samart C. and C. Sokman (2008) *Synthesis of mesoporous silica for control releasing application*. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2008) 30Jan-1Feb, Bangkok, Thailand

Samart C. and C. Sokman (2008) *Effect of silica sources in nanoporous silica synthesis on releasing behavior of indigo carmine*. The 2nd Thailand Nanotechnology Conference 2008 13-15 Aug, Phuket, Thailand

สัมมนาในประเทศ (Local Conference)

ชนาธิป สามารถ และอภิญญา ดวงจันทร์ (2549) กระบวนการเปลี่ยนพอลิไวนิลคลอไรด์ไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนซิลิกาอะลูมินา และตัวเร่ง

ปฏิกิริยากรด สัมมนาวิจัยพลังงาน สร้างฐานเศรษฐกิจพอเพียง 13-14 ธันวาคม กรุงเทพฯ
ประเทศไทย

รางวัลที่เคยได้รับ (Received award)

Award for Excellent Poster Presentation at The 3rd workshop on Regional Network Formation for Enhancing Research and Education Penang, Malaysia

The 3rd award for poster competition in The 1st Thailand nanotechnology conference 2007. 14-16 August, Chiang Mai, Thailand.

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัย ว่าได้ทำการวิจัยคล่องแล้วประมาณร้อยละเท่าใด

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (ผู้ร่วมโครงการ) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณปี 2550-งบแผ่นดิน ทำการวิจัยคล่องแล้วประมาณ 90%

การพัฒนาเทคนิคการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (ผู้ร่วมโครงการ) ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณประจำปี 2551-งบแผ่นดิน เริ่มตั้งแต่ตุลาคม 2550 การวิจัยคล่องไปแล้ว 90%

